INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
SOLUCIONES ENERGÉTICAS INNOVADORAS | GALAXIAS PERDIDAS | USO MÉDICO DE ALUCINÓGENOS
N.º 418
JULIO 2011

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COSMOLOGÍA
En busca de galaxias perdidas

NEUROCIENCIA
¿Cómo ajustamos los ritmos circadianos?

EVOLUCIÓN
La falsa revolución de *Homo sapiens*

Soluciones Energéticas Innovadoras

Aunque atrevidas, podrían resultar revolucionarias



6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Julio 2011 Número 418

24

ARTÍCULOS


7


44


90

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La investigación en energías renovables aumentará de manera gradual los recursos disponibles, pero una mejora drástica solo llegará de la mano de propuestas innovadoras. En este número hemos seleccionado siete de ellas. Si bien puede que cuenten con pocas probabilidades de abrirse paso, en caso de lograrlo cambiarían por completo el panorama energético. Ilustración de Chris Labrooy.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2011

SEXO Y HUESOS

Aunque el descubrimiento de la fecundación interna en fósiles de hace 375 millones de años revista la importancia que John A. Long expone en «Origen de la copulación» [Investigación y Ciencia, marzo de 2011], su artículo salta de los Placodermos a los tetrápodos sin hacer mención de los peces de aletas lobuladas. El pez fósil *Tiktaalik*, descubierto en 2006, data del mismo período y su esqueleto se asemeja mucho más al de los tetrápodos que al de los placodermos descritos por Long. En particular, incluye homólogos de los huesos del brazo y hombro, así como rasgos que emulan cuello y oídos. Si, como sugiere el artículo, los abrochadores son los antecesores de las extremidades de los tetrápodos, ¿en qué lugar de ese linaje encajarían los peces semianfibios de aletas lobuladas como *Tiktaalik*, contemporáneos de esos placodermos?

Robert Wilson
Salt Lake City, Utah

Responde Long: Tiktaalik *es lo más parecido a un tetrápodo que puede serlo un pez; tan solo le faltan dedos en las manos y los pies. Por desgracia, los fósiles de peces de este tipo no aportan indicio alguno sobre su estrategia reproductora. Los parientes vivos más próximos a estas criaturas de transición son los peces de aletas lobuladas; entre ellos, los peces pulmonados, que desovan en el agua, y el celacanto, que posee fecundación interna aunque carece de abrochadores. A medida que los vertebrados han evolucionado, la copulación ha hecho lo propio por varios caminos independientes, con lo que numerosas familias han mantenido el desove simple. Pero, tanto si las especies modernas desovan como si copulan, las partes anatómicas que emplean para ello proceden del mismo tejido embrionario bajo la dirección de los mismos genes, llamados* hox, *que formaban los abrochadores en los Placodermos.*

CIGARRILLOS RADIACTIVOS

El artículo «Humo radiactivo», de Brianna Rego [Investigación y Ciencia, marzo de 2011], detalla prácticas de ética dudosa por parte de la industria tabaquera. Es cierto que en los cultivos de tabaco se utilizan, con buenos resultados, fertilizantes de fosfatos ricos en uranio. Uno de los productos de desintegración del uranio es el polonio 210, el cual se inhala en el humo del cigarrillo. No soy fumadora, pero me pregunto qué otros productos pueden contener polonio. ¿Utilizan los agricultores el mismo tipo de abono? ¿Y los cultivadores de algodón?

Rachel Allgood
Savannah, Georgia

Responden los editores: *El polonio 210 emite radiación alfa, que pierde rápidamente su energía en el aire y queda bloqueada por la ropa o la piel. Fuera del cuerpo, por tanto, es inocua. La ingestión del isótopo sí presenta cierto riesgo de provocar cáncer, pero, según el Laboratorio Nacional Argonne, en Illinois, su inhalación —como cuando se fuma un cigarrillo— resulta seis veces más peligrosa que la ingestión por vía alimentaria.*

VIDA ALEATORIA

¿Cómo puede saber la cromatina, la gruesa fibra que forma el ADN al plegarse sobre sí mismo, en qué posiciones se ha de relajar o tensar para permitir la transcripción del ADN, como describe por Tom Misteli en «La vida interior del genoma» [Investigación y Ciencia, abril de 2011]? Supongo que el gen activado emitirá alguna señal que recorrerá la cadena de histonas (los «carretes» en los que se enrollada el ADN) para relajar los vínculos entre ellas. Pero, una vez completada la transcripción, se necesitaría otra señal procedente del mismo gen para volver a condensar la cadena. ¿Son acaso los remodeladores de la cromatina los que transportan y ejecutan esas señales?

Matthew Morycinski
Vancouver, Columbia Británica

Responde Misteli: *La fibra de cromatina se abre y se cierra continuamente debido a la acción estocástica de los remodeladores de cromatina que recorren el núcleo de la célula. Una vez abierta, una región de cromatina se mantiene durante cierto tiempo en ese estado. Si en ese período se le une un factor de transcripción activador, podría producirse una activación de gen; si ello no sucediera, la cromatina volvería a cerrarse. En respuesta a señales como las hormonas, los factores de transcripción suelen sufrir modificaciones que les confieren mayor afinidad para unirse a su diana. Con ello se consigue que esa unión sea más intensa y prolongada, y que la respuesta transcripcional se mantenga. Cuando la señal cesa, los factores de transcripción se desprenden del gen diana y su actividad se reduce. Otro factor puede ser también una proteína modificadora de la histona, que de manera más permanente marque una región a fin de que se abra o se cierre.*

Cada vez hay más pruebas de que los caminos de transducción de señales se relacionan con los remodeladores de la cromatina y los modificadores de la histona. Su funcionamiento detallado y los procesos por los que estos complejos localizan sus dianas representan cuestiones esenciales que aún hemos de resolver.



Abril 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

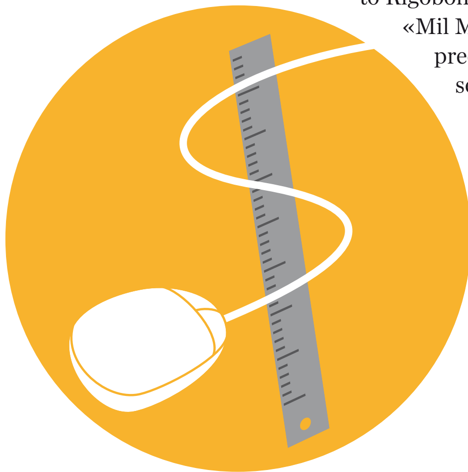
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

ECONOMÍA

El precio justo

En plena era de la información, los empleados de la Oficina de Estadísticas Laborales de EE.UU. aún continúan llamando por teléfono para averiguar cuánto cobra un dentista y siguen visitando los comercios para tomar nota de los precios. Al final, los datos son precisos, pero se tarda en torno a un mes en recopilarlos y analizarlos. A fin de acelerar el proceso, Alberto Cavallo y Rigoberto Rigobon, economistas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han creado el proyecto de los «Mil Millones de Precios» (bpp.mit.edu): un soporte lógico que indexa páginas web y rastrea los precios de más de cinco millones de productos de algo más de setenta países. Gracias a ello, se obtienen tasas de inflación en tiempo real.



El proyecto no pretende sustituir a las estadísticas oficiales, ya que no incluye los precios de aquellos servicios inaccesibles a través de Internet, como visitas al peluquero o al dentista. No obstante, semejante rapidez a la hora de recopilar datos podría resultar de gran utilidad en momentos de incertidumbre económica: tras el terremoto de Chile en febrero de 2010, el Gobierno utilizó las cifras de Cavallo y Rigobon para controlar los precios de la comida y detectar cualquier aumento brusco. En la actualidad, Cavallo intenta extender el método a los cálculos del producto interior bruto. En caso de tener éxito, la empresa revestiría no poca importancia. En palabras de Laurence Ball, economista de la Universidad Johns Hopkins: «Es el PIB lo que determina si un período de recesión es inminente».

—Michael Easter

MATEMÁTICAS

Descifrado un enigma de un siglo de antigüedad

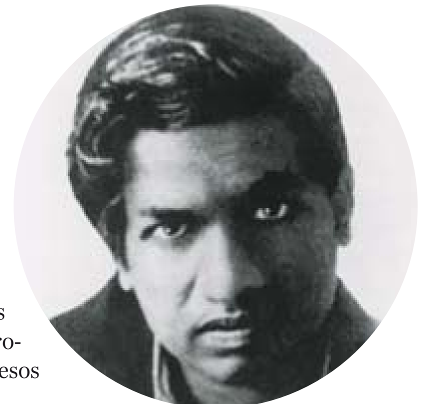
Para tratarse de alguien que murió a los 32 años de edad, Srinivasa Ramanujan, matemático prácticamente autodidacta, dejó un legado impresionante. Ahora, los expertos en teoría de números han descubierto por fin el sentido de una de sus afirmaciones más crípticas, escrita un año antes de su muerte en 1920.

El asunto gira en torno a las particiones, un concepto sencillo solo en apariencia. La función de partición $p(n)$ cuenta las maneras de expresar un número entero positivo n como suma de otros. Por ejemplo, para el número 5, existen siete opciones:

$$5 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 2 = \\ = 1 + 1 + 3 = 1 + 2 + 2 = 1 + 4 = 2 + 3 .$$

Es decir, $p(5) = 7$. Para el número 6 hay 11 posibilidades, por lo que $p(6) = 11$. A medida que crece n, el número de particiones aumenta con gran rapidez. Por ejemplo, $p(100) = 190.569.292$, y $p(1000)$ es un número de 32 cifras.

Durante siglos, los matemáticos han intentado comprender las particiones, buscando, entre otras cosas, relaciones entre ellas. Ramanujan se percató de que, si comenzaba con el número 9 y le añadía múltiplos de 5, las particiones de los números resultantes eran divisibles entre 5: $p(9) = 30$, $p(9 + 5) = 135$, $p(9 + 10) = 490$, $p(9 + 15) = 1575$, etcétera. Propuso que algunas recurrencias de ese estilo debían mantenerse indefinidamente y que debían existir relaciones similares al considerar, en vez de múltiplos de 5, múltiplos de 7 y de 11, los dos números primos siguientes. Además, deberían darse relaciones análogas para las *potencias* de 5, 7 y 11. Así, habría una sucesión infinita de números n separados por intervalos de 5^3 tales que todas las $p(n)$ correspondientes fuesen divisibles por 125. Después, como si de un oráculo se tratase, Ramanujan escribió que *no* deberían existir «propiedades simples» de esa clase para los números primos mayores. En otras palabras, conjeturaba la ausencia de secuencias de particiones $p(n)$ tales que todas fuesen divisibles por 13, 17, 19, etcétera. Desde entonces, los matemáticos han buscado sin éxito patrones en los que intervengan esos números primos.



Srinivasa Ramanujan

En enero, Ken Ono, de la Universidad Emory, y sus colaboradores hallaron fórmulas que relacionaban las funciones de partición de series de números n separados por intervalos de las potencias de 13 (13, 13^2, 13^3...), así como de los números primos superiores. Las fórmulas no resultan «simples», en el sentido de que las $p(n)$ no son divisibles entre las potencias de 13; en cambio, revelan relaciones entre los *restos* de dichas divisiones. Para cada número primo, a medida que el exponente crece, las recurrencias que se obtienen recuerdan a las que aparecen en los fractales, estructuras geométricas con patrones característicos que se repiten a todas las escalas.

En otro resultado hecho público también en enero, Ono y un colaborador dieron con la primera fórmula para calcular directamente $p(n)$ para cualquier n, un logro que hasta ahora había eludido los esfuerzos de los expertos en teoría de números.

¿Qué aplicaciones prácticas hallarán estos descubrimientos? George E. Andrews, de la Universidad estatal de Pennsylvania, lo encuentra difícil de predecir: «Los avances en matemáticas puras pueden tardar un tiempo en convertirse en aplicaciones prácticas».

—Davide Castelvecchi

ANIMACIÓN POR ORDENADOR

Luz al final de la pista



Las películas de los estudios Pixar se desarrollan en reinos de fantasía. Pero la ciencia y la técnica necesarias para crear esos mundos se originan en la realidad. Para *Cars 2*, las mentes detrás de filmes como *Toy Story*, *Up* y *WALL E* tuvieron que estudiar las formas complejas en las que la luz se refleja en los coches.

La película deja atrás su escenario original, una ciudad somnolienta del desierto, para desarrollarse en el mundo de las carreras. Sus creadores debieron representar, por ello, un gran número de automóviles circulando por una variedad de pistas y circuitos. El sistema de iluminación 3D de Pixar exigía una renovación. Necesitaban investigar el comportamiento de la luz en vehículos que se movían con rapidez y cómo su movimiento y cualidades reflectoras se comportaban en el entorno.

Estudiaron las propiedades absorbentes de la luz en la pintura de los coches, la fibra de carbono y el cromo, así como la intensidad de la oscuridad y el alcance de los faros estándar o de cristal líquido. Los resultados se programaron en algoritmos para calcular y convertir en tiempo real, la frecuencia y temperatura de la luz, y el color en materiales reflectantes, absorbentes y deformables.

La investigación se integró luego en un nuevo motor de iluminación, un programa informático que permite recrear escenas que parecen iluminadas desde cualquier ángulo. Es el tipo de efecto que persigue un director de fotografía en la vida real. Esta herramienta se incorporó en un sistema de cámara virtual, lo que permitió crear ambientes desde cualquier perspectiva de cámara.

El programa permitió recrear el centro de la ciudad de Tokio con todas sus luces de neón y mantenerlas de forma automática, creando así las relaciones lumínicas correctas. De ese modo, mientras el personaje Lightning McQueen corre por la ciudad, la iluminación del coche y las luces de neón reflejan su pintura roja, y este destello rojizo puede reflejarse también en un charco mientras pasa el automóvil. Todo esto se logra sin que los animadores tengan que ilustrar los efectos «a mano» y escena por escena.

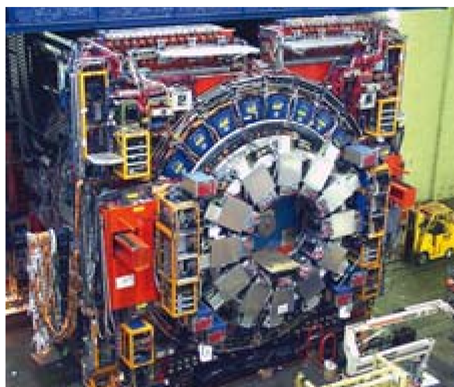
Después de que *Cars 2* desaparezca en el horizonte, Pixar utilizará su nueva herramienta de iluminación en próximas películas.

—John Scott Lewinski

ALTAS ENERGÍAS

Resultados contradictorios en el Tevatrón

En abril, la colaboración CDF (la responsable de uno de los dos detectores del acelerador de partículas Tevatrón, cerca de Chicago) provocó un revuelo al anunciar que cierto experimento se desviaba de manera significativa de las predicciones teóricas. En colisiones protón-antiprotón en las que se producían un bosón *W* y dos chorros de hadrones (partículas formadas por quarks) se observaba un exceso considerable de eventos cuando la masa del par de chorros rondaba los 150 gigaelectronvoltios. La interpretación más sencilla apuntaba a una nueva partícula cuya masa rondaría unas 150 veces la del protón. Las características del experimento descartaban que la partícula fuese el bosón de Higgs, por lo que las hipótesis se multiplicaron. Desde entonces, más de medio centenar de artículos han intentado explicar el origen de la anomalía.



En mayo, CDF repitió el análisis, esta vez con casi el doble de datos de colisiones. Obtuvo el mismo resultado y redujo al 0,001 por ciento la probabilidad de que se tratase de una fluctuación estadística. Así las cosas, los responsables de D0, el otro detector del Tevatrón, decidieron analizar sus propios datos. El 10 de junio anunciaron los resultados: no veían ningún exceso de eventos.

¿Quién se equivoca? La mayoría acepta las conclusiones de D0, ya que coinciden con las predicciones teóricas. Pero, si CDF ha dado un falso positivo, ahora lo principal es averiguar por qué. El detector CDF ha mostrado funcionar a la perfección durante 25 años. Si se descarta que todo se debiese a una fluctuación estadística de los datos, lo que se antoja muy improbable, queda la opción de un error durante la modelización del proceso o en la supresión del ruido. La anomalía afectaba a una pequeña brizna entre un pajar descomunal de productos de colisiones, por lo que el análisis de los datos reviste una complicación enorme. No obstante, el cálculo fue revisado a conciencia por parte de los centenares de expertos que trabajan en CDF. Con toda seguridad, aislar el origen de la discrepancia no resultará sencillo. *—IyC*

CORTESÍA DE DISNEY/PIXAR (*coche*), CDF/FERMILAB (*detector CDF*)

AGENDA

CONGRESOS

Del 30 de julio al 7 de agosto
Congreso mundial de química
Puerto Rico
www.iupac2011.org

EXPOSICIONES

Hasta el 10 de julio
Inaudito, la aventura de oír
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa (Barcelona)
www.mnactec.cat

Exposición virtual
Seres modélicos. Entre la naturaleza y el laboratorio
Organiza: CSIC
www.seresmodelicos.csic.es



Afinidades electivas: Valencia y la revolución química
Organiza: IHMC López Piñero y Universidad de Valencia
Palacio de Cerveró
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es

OTROS

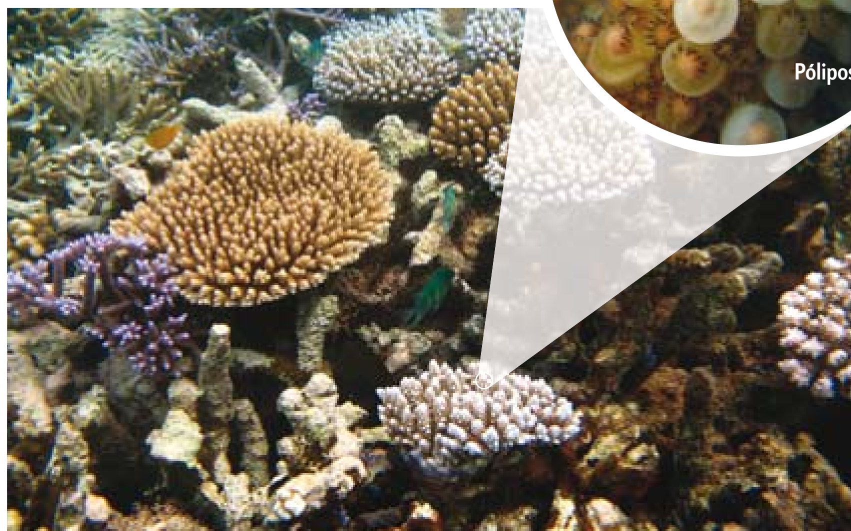
Del 3 al 6 de julio
15as Jornadas sobre el aprendizaje y la enseñanza de las matemáticas
Laboral Ciudad de la Cultura
Gijón
www.15jaem.org

Del 4 al 8 de julio – Curso
Astronomía para todos. El año del sistema solar
Cosmocaixa
Madrid
www.obrasocial.lacaixa.es

Del 6 al 8 de julio - Encuentro
Terremotos y tsunamis
Cursos de verano de El Escorial
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.ucm.es/cursosverano

ECOLOGIA

Reproducción del coral



Es difícil cortejar al sexo opuesto cuando se está fijo en un sustrato. Ello explica la ausencia de apareamiento en los pólipos (los animales diminutos cuyos exoesqueletos forman los corales). Su estrategia para reproducirse consiste en desprender millones de espermatozoides y de óvulos que se dejan llevar hasta la superficie del océano. Allí entran en contacto, se produce la fecundación y se forman larvas que se alejan flotando para establecer nuevos arrecifes coralinos.

Quizá los pólipos no se muestren muy exigentes a la hora de escoger pareja, pero son de lo más puntuales: con una actividad febril, liberan los espermatozoides y los óvulos durante una noche al año, o quizás unas pocas noches consecutivas; y, por lo general, lo hacen poco después de la puesta del sol, en los atardeceres siguientes a una luna llena. Los científicos están ahora empezando a resolver el misterio de esa proeza de simultaneidad.

Puesto que los pólipos carecen de un sistema nervioso central, se planteaba la pregunta sobre la manera en que los distintos pólipos se coordinaban entre sí. Por lo general, un arrecife elige un día de luna llena de verano para frezar, durante unos 20 minutos, en las horas crepusculares. Aunque se ignora el modo en que los corales reconocen el mes en que han de reproducirse, Alison Sweeney, bióloga evolutiva de la Universidad de California en Santa Bárbara (UCSB), esbozó una cuestión más ajustada todavía: ¿cómo seleccionan los corales el momento preciso para frezar?

Sweeney sospechaba que los pólipos utilizaban como señal un cambio de matiz en el color del cielo del crepúsculo, que vira del rojo al azul. En la puesta de sol, la luz recorre un camino más largo a través de la atmósfera que filtra el azul, y el horizonte se torna más rojo. Antes de la luna llena, el satélite alcanza el cielo antes de la puesta de sol y, al reflejar la luz solar, añade más rojo. Justo después de una luna llena, cuando la puesta de sol precede a la salida de la Luna, el crepúsculo se vuelve más azul.

Para comprobar su hipótesis, Sweeney llevó a un equipo de la UCSB y de la Universidad de Duke a las islas Vírgenes en agosto de 2009. Observaron un arrecife de coral de astas de alce (*Acropora alcicornis*), una especie común en el Caribe, durante seis tardes, cerca de la época en que creían que liberaría óvulos y espermatozoides. Suspendieron un cable óptico hasta la profundidad del arrecife (unos 2,5 metros bajo el agua), conectado a un espectrofotómetro flotante. Advirtieron cambios en el color del océano cada atardecer. De modo consecuente, este reflejaba el color del cielo. El coral frezó durante los crepúsculos de azul radiante: las noches tercera y cuarta después de la luna llena, entre las 21:20 y las 21:50.

El grupo de Sweeney, que describió sus resultados en el *Journal of Experimental Biology* en febrero, sospecha que, al igual que los erizos de mar (que sincronizan asimismo su reproducción con los ciclos lunares), el coral de astas de alce también percibe los cambios de color a través de la piel, que contiene fotorreceptores del tipo existente en la retina humana.

—Rebecca Coffey

ALBERT MALLOL Y PERE BARNOLA, WWW.FLORACATALANA.NET (*flor*); CORTESÍA DE CHARLIE BOCH, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, SANTA BARBARA (*coral*)

ENERGÍA NUCLEAR

Fukushima: ¿parque temático?



Veinticinco años después de la catástrofe nuclear de Chernóbil, toneladas de hormigón escudan a trabajadores y visitantes de la radiactividad del combustible fundido que yace en las profundidades. En Three Mile Island, por el contrario, el reactor contiguo —e idéntico— al que hace ya más de treinta años sufriera una fusión parcial del núcleo sigue aún funcionando y rodeado de viviendas habitadas.

Estos dos escenarios (la explotación mantenida o el entierro y abandono de la planta) delimitan el abanico de opciones que se le ofrecen a Fukushima Daiichi. Al menos tres de sus seis reactores han sufrido una fusión parcial del núcleo, al igual que dos de las siete piscinas de combustible usado. Según Kurt Kehler, vicepresidente de desmantelamientos y demoliciones de la empresa de ingeniería CH2M HILL, de Colorado, son varios los reactores dañados, por lo que es probable que haya dos o tres maneras de desmantelar la central.

El destino final de Fukushima dependerá del grado de fusión del combustible, del nivel de contaminación del terreno y del dinero que el Gobierno japonés desee invertir en las labores de limpieza. Tepco, la compañía operadora de la central, estima que el núcleo de al menos uno de los reactores se habría fundido por completo. En tal caso, las barras de combustible formarían un amasijo no muy diferente del que se generó en Chernóbil, donde fue necesario enterrar el reactor bajo un sarcófago descomunal. Además, la contaminación en el área de Fukushima se ha extendido unos 30 kilómetros a la redonda y ha llegado incluso a algunas ciudades más allá de ese perímetro. Es el caso de Iitate, la cual deberá ser abandonada a menos que el suelo sobre el que se levanta se renueve por completo. Unos 80.000 residentes de otras poblaciones en circunstancias similares ya han sido evacuados.

Mientras que el Gobierno de Japón insta a la demolición de la planta, Tepco preferiría recuperar los reactores dañados en caso de que fuese posible. Por desgracia, puede que ninguna de las partes vea cumplidos sus deseos: si el combustible hubiese quedado convertido en una masa informe, los elevados niveles de radiación impedirían cualquier labor de demolición y habría que sepultar la planta. Al igual que ocurrió a los ucranianos y bielorrusos que jamás regresaron a la zona de exclusión en torno a Chernóbil, es posible que quienes habitaban en las proximidades de Fukushima tampoco regresen jamás a su hogar, y granjeros y pescadores quizá nunca retomen su actividad. En resumidas cuentas, el área en torno a Fukushima podría quedar convertida en una zona desierta durante años: un nombre más que añadir a la lista de parques nucleares inesperados y otro testimonio de los peligros de la energía nuclear.

—David Biello

¿QUÉ ES ESTO?



Seda multicolor: En Singapur, algunos gusanos de seda tejen capullos de colores. Un equipo del Instituto de Investigación e Ingeniería de Materiales del país asiático espera poder desembarazarse en breve del proceso de teñido de la seda, el cual, además de laborioso, consume una gran cantidad de agua. Los investigadores añadieron ciertas moléculas fluorescentes a las hojas de morera pulverizadas que componen el alimento habitual de los gusanos de seda (*Bombyx mori*). Según la autora principal del estudio, Natalia C. Tansil, las orugas absorben el tinte y lo incorporan a las fibras de seda. Esta seda luminiscente, descrita en un número reciente de la edición electrónica de la revista *Advanced Materials*, también contaría con aplicaciones potenciales en medicina regenerativa, ya que podría servir para monitorizar con facilidad las matrices biodegradables que se emplean en la reconstrucción de huesos y tejidos. Si bien parece que las aplicaciones biomédicas llevarán más tiempo, Tansil espera que las textiles estén listas dentro de pocos años. *—Ann Chin*

GETTY IMAGES (*Fukushima*); CORTESÍA DEL INSTITUTO A*STAR DE INVESTIGACIÓN E INGENIERÍA DE MATERIALES, SINGAPUR (*capullos*)

GEOLOGÍA

Rayos, truenos y fulguritas

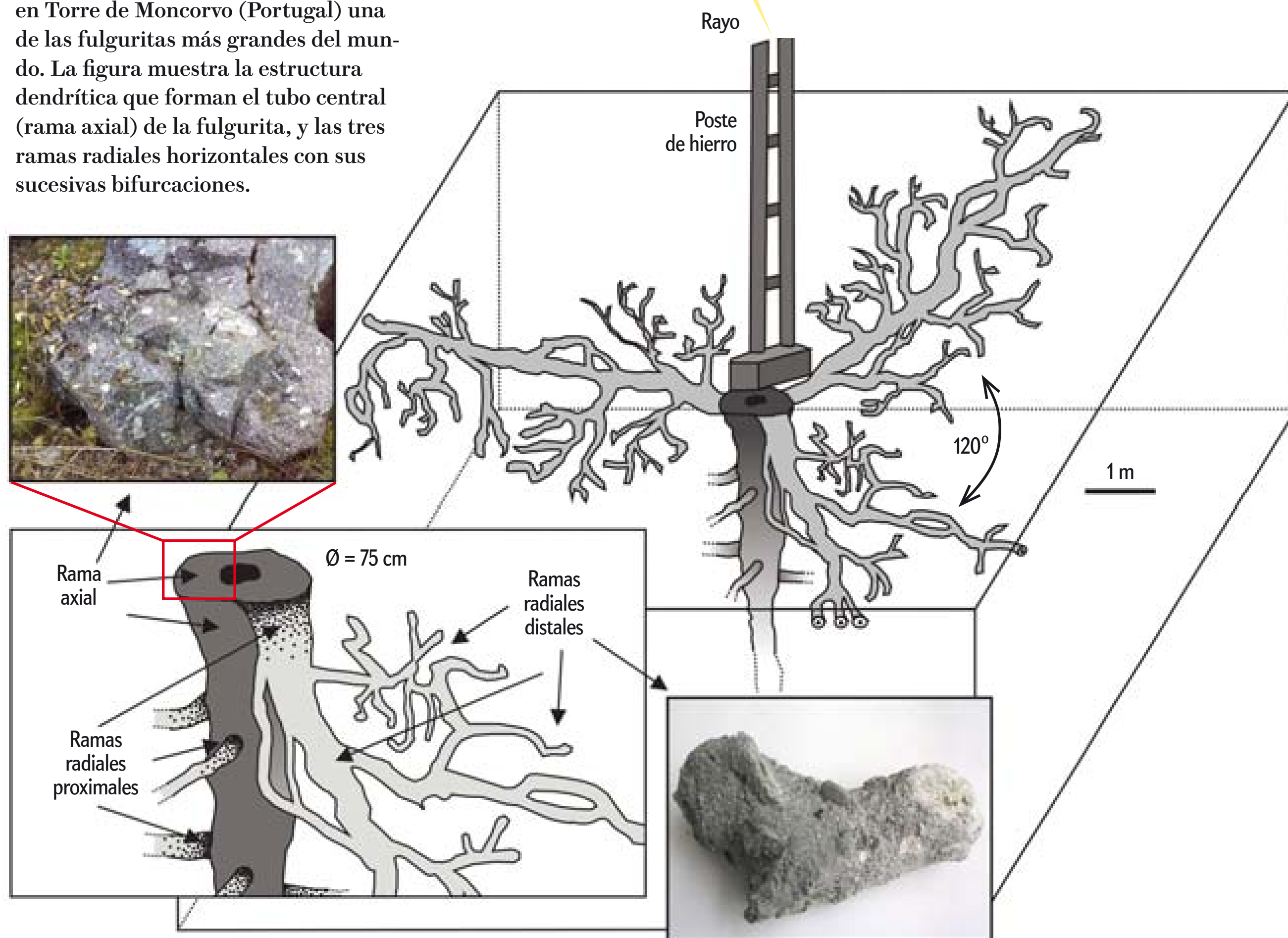
El impacto de un rayo sobre el suelo puede dar lugar a la formación de vidrios naturales en forma de árbol subterráneo

Según el Sistema de Detección Mundial de Meteorología, diariamente se generan en el mundo unos 8.000.000 de rayos. Por poner un ejemplo, solo el 2 de julio de 2010 cayeron en la península Ibérica en un período de 6 horas un total de 2088 rayos (según la Agencia Estatal de Meteorología). La caída de rayos puede conllevar ciertos contratiempos (derribo de líneas eléctricas, daños en edificios, etcétera), pérdidas económicas importantes y algunas muertes. Si, además, la potencia de la descarga eléctrica atmosférica es suficientemente alta, pueden generarse fulguritas.

Las fulguritas (del latín *fulgur*, «relámpago») son vidrios naturales que se forman como resultado de la acción de descargas eléctricas atmosféricas sobre un suelo o una roca. Un rayo suele tener un diámetro de entre 2 y 5 centímetros, una velocidad de 94.000 kilómetros por segundo, una temperatura de 17.000 a 39.000 ºC y un pico de corriente de 10.000 a 30.000 amperios. Este aumento de temperatura tan notable e instantáneo funde el terreno por donde penetra el rayo. La masa fundida se enfría rápidamente generando la fulgurita. Se necesitan varios milisegundos de un impacto potente y temperaturas en torno a 2000 ºC para que se genere el proceso de fusión. En la formación de fulguritas intervienen varios parámetros: la dirección del rayo, la intensidad de la corriente eléctrica, la humedad y la textura del suelo; no se ha cuantificado todavía la influencia de cada parámetro.

Una fulgurita suele tomar la forma de un cilindro hueco de dimensiones centimétricas, constituido por el vidrio derivado de la fusión del material que había en el momento y el lugar del impacto. La parte interna del tubo suele presentar un aspecto brillante; la parte externa, en cambio, es rugosa, debido a la presencia de fragmentos de minerales o roca que no han llegado a fundir. La morfología del tubo suele ser dendrítica (como las ramas de un árbol) y refleja la trayectoria del rayo al penetrar en el terreno. Las fulguritas pueden presentar diferentes colores, según la composición del material previo al impacto. Es muy frecuente la presencia de burbujas de tamaños distintos, debidas a la expansión de gases (generalmente aire) generada durante el impacto. Las texturas responden a un proceso de fusión y enfriamiento rápido, sin tiempo suficiente para la cristalización de fases minerales

La caída de un rayo el 24 de mayo de 1998, inducida por la presencia de un poste eléctrico de hierro, generó en Torre de Moncorvo (Portugal) una de las fulguritas más grandes del mundo. La figura muestra la estructura dendrítica que forman el tubo central (rama axial) de la fulgurita, y las tres ramas radiales horizontales con sus sucesivas bifurcaciones.



sino únicamente de importantes masas de vidrio (amorfo).

Tradicionalmente, las fulguritas se han clasificado en dos grupos, en función de la superficie en la que impacta el rayo. Por un lado, tenemos las fulguritas formadas por el impacto de un rayo en un suelo arenoso, en general dunas o playas. Se trata del tipo más frecuente, dada la facilidad de los rayos para penetrar en materiales no consolidados y con agua retenida en los poros. También se han descrito fulguritas en suelos arcillosos o en suelos de grava, aunque son mucho menos comunes. El otro tipo corresponde a las fulguritas generadas por el impacto de un rayo sobre rocas. Presentan conductos más cortos y se forman aprovechando direcciones de fracturación existentes originalmente en la roca.

Una fulgurita ejemplar

El día 24 de mayo de 1998 cayó en Torre de Moncorvo (en el noreste de Portugal, cerca de la frontera con la provincia de Salamanca) un rayo que generó una gran fulgurita. La caída fue inducida por la presencia de un poste de hierro de unos veinte metros de altura, que sustentaba el tendido eléctrico que discurría por la zona. El rayo impactó en la parte alta del poste, seccionó los cables eléctricos, descendió por un lateral e impactó cerca de la base del mismo. Según los datos facilitados por vecinos de la zona y los bomberos locales, durante los dos días posteriores a la descarga, se mantuvieron en el punto de impacto temperaturas elevadas y una intensa electricidad estática.

El poste se asienta sobre un suelo granítico utilizado como campo de labor para el cultivo de árboles frutales. El impacto del rayo fundió un área pseudocilíndrica vertical de unos 75 centímetros de diámetro y varios metros de profundidad, de la cual partieron varias ramas horizontales (de unos 7 metros de longitud) con grosor cada vez menor cuanto más lejos se encontraran del cilindro central, bifurcándose reiteradamente según un patrón en apariencia aleatorio. Se han identificado dos tipos de vidrios cuya formación está relacionada con procesos de desmezcla, muy frecuentes en otros procesos de formación de vidrio, como los volcánicos. Esta fulgurita, una de las más grandes del mundo descritas hasta la fecha, puede verse hoy en el Museo Geominero de Madrid (www.igme.es/museo).

Aplicaciones

El estudio de las fulguritas tiene varias aplicaciones. El análisis de la composición de los gases atrapados en una fulgurita del desierto de Libia, por ejemplo, se ha utilizado para la reconstrucción paleoecológica de la zona: ha revelado que, hace 15.000 años, el desierto de Libia se hallaba cubierto de plantas.

El estudio de la fulgurita de Torre de Moncorvo ha puesto en marcha un nuevo equipo de investigación con el objetivo de aplicar los resultados de este trabajo a la conservación de edificios históricos de granito. Este nuevo proyecto pretende trasladar el conocimiento adquirido en el estudio geológico al campo de la conservación de patrimonio construido en granito, ya que, hasta el momento, el impacto de rayos en edificios y los incendios derivados de las altas temperaturas generadas no se ha investigado en detalle.

Cuando contemple el próximo rayo en una tormenta piense, ¿cuántas fulguritas se deben estar formando ahora?

—Ruth González Laguna
y Rafael Pablo Lozano Fernández
Museo Geominero
Instituto Geológico y Minero de España
Madrid
Tomás Martín Crespo
Universidad Rey Juan Carlos
Madrid

MATERIALES

Regeneración ósea

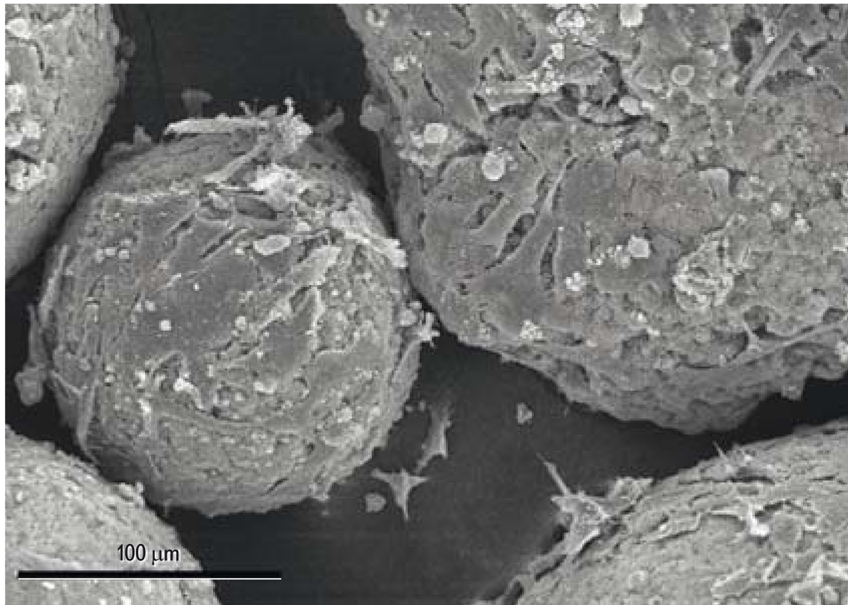
Se están desarrollando nuevos materiales con capacidad de convertirse en hueso

Si nos propusieran substituir nuestros huesos por una superaleación de alta resistencia, seguramente rechazaríamos la oferta. Nuestra decisión sería, sin duda, la acertada. Si bien es cierto que la ciencia de materiales ha desarrollado materiales avanzados, con excelentes propiedades mecánicas, no es fácil lograr la combinación de ligereza, tenacidad, flexibilidad y resistencia que presenta el hueso. Además, el hueso cumple una serie de necesidades metabólicas y fisiológicas que van más allá de la función mecánica.

El hueso es un material nanocompuesto: consta de una matriz de fibras de colágeno, reforzadas con nanocristales de un fosfato cálcico, la hidroxiapatita. La fase mineral representa alrededor del 65 por ciento en peso del tejido óseo. Sin embargo, las propiedades del hueso no se explican simplemente por las materias primas de las que está hecho, sino por su compleja estructura. Además, el tejido óseo posee la capacidad de autogenerarse, de fabricarse a sí mismo, ya que contiene en su seno las células que deposita la matriz ósea, los osteoblastos. De ahí que pueda adaptarse a las condiciones biomecánicas y consolidar fracturas (siempre y cuando exista una estabilidad mecánica y el defecto no sea demasiado grande).

En ocasiones, sin embargo, ese mecanismo de regeneración falla: cuando se producen grandes defectos óseos por traumatismos abiertos o por resección de tumores. También puede ser necesario aumentar la cantidad de hueso, previamente a la colocación de un implante. En ambos casos, se requieren materiales que operen a modo de puente, que conduzcan el crecimiento óseo y, si es posible, lo estimulen. Se trata de un problema frecuente. Unos dos millones de personas de todo el mundo se someten anualmente a tratamientos de regeneración ósea. La estrategia más común es el uso de autoinjertos. Pero presentan inconvenientes: requieren una segunda intervención quirúrgica y su disponibilidad es limitada. Los injertos procedentes de banco de hueso o de otras especies animales no están tampoco libres de problemas, como las reacciones inmunológicas o la transmisión de enfermedades.

El desarrollo de materiales sintéticos surge como una estrategia distinta, que permite superar las limitaciones asociadas a los problemas mencionados. Aunque representan en la actualidad solo el 15 por ciento del mercado de los materia-



La ingeniería de tejidos propone la combinación de biomateriales con células para favorecer la osteogénesis en situaciones especialmente críticas, como grandes defectos o fracturas con dificultad de consolidación. En esta imagen de microscopía electrónica de barrido se muestran osteoblastos cultivados sobre microtransportadores de hidroxiapatita.

les para regeneración ósea, su uso está experimentando un fuerte crecimiento.

Materiales bioactivos

Aunque ya con anterioridad se habían utilizado materiales sintéticos para intentar regenerar el hueso, como el sulfato de calcio, el punto de partida del desarrollo de materiales sintéticos para la regeneración ósea se puede situar en 1969, cuando Larry Hench, entonces en la Universidad de Florida, obtuvo el Bioglass®, un vidrio con capacidad de formar un enlace directo con el hueso. Hasta ese momento se creía que la respuesta universal del tejido óseo ante la implantación de un material era la formación de una cápsula fibrosa que aislaba el material del tejido. En este contexto, y como contraposición a los materiales inertes o de primera generación, nació el concepto de materiales bioactivos, que permiten el crecimiento óseo sobre su superficie. A este grupo, además de los vidrios desarrollados por Hench, pertenecen también los fosfatos de calcio, como la hidroxiapatita o el fosfato tricálcico beta (β-TCP). Estos materiales cerámicos son los que cubren actualmente en su mayor parte el mercado de los sustitutos óseos sintéticos.

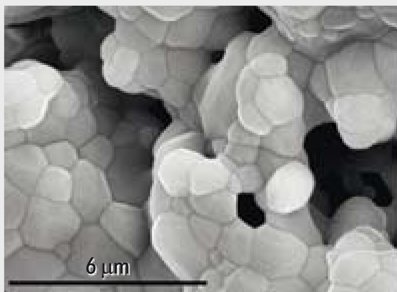
En un primer momento, los esfuerzos se dirigieron a la mejora de las propiedades mecánicas de las cerámicas bioactivas. Sin embargo, pronto se abandonó este camino, al tomar fuerza el paradigma de la medicina regenerativa: el objetivo final no debería ser tener un sustituto óseo con buenas propiedades mecánicas, sino regenerar el mismo tejido óseo. El material debía tener una función temporal, y sustituirse progresivamente por tejido óseo neoformado. Por tanto, era necesario contar con materiales que fueran, además de bioactivos, reabsorbibles. Son los materiales de tercera generación, según la terminología acuñada por Hench.

Ello supuso un giro en la investigación sobre materiales para la regeneración ósea. De la hidroxiapatita sinterizada, un material bioactivo pero no reabsorbible, se pasó al interés por técnicas de obtención a baja temperatura, que permiten obtener una hidroxiapatita más similar a la fase mineral del hueso, con menor cristalinidad, mayor superficie específica y mayor reactividad. Por otra parte, se introdujeron otros fosfatos de calcio más reactivos, como la brushita o el fosfato tricálcico alfa.

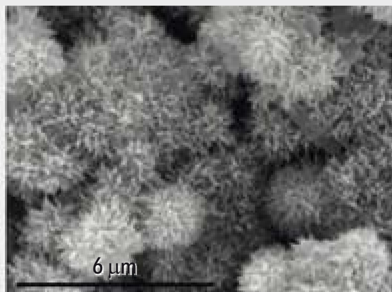
En la mayor parte de los casos, los materiales para la regeneración ósea se utilizan en forma de gránulos, pequeñas partículas de entre 0,1 y 5 milímetros. Otra estrategia corresponde al desarrollo de bloques cerámicos macroporosos, en los que la macroporosidad cumple una doble misión: activar la reabsorción y facilitar la colonización tisular y la angiogénesis. Ello entronca con la función del material en medicina regenerativa como un andamio temporal, que facilita la formación de tejido nuevo para luego desaparecer.

MEDICINA REGENERATIVA

La mayor parte del mercado actual de los sustitutos óseos corresponde a materiales cerámicos bioactivos o de segunda generación. El hueso crece directamente sobre la superficie de estos compuestos, que luego se osteointegran. A este grupo pertenecen los fosfatos de calcio, como la hidroxiapatita o el fosfato tricálcico beta (β-TCP, *izquierda*). Sin embargo, en la actualidad se están desarrollando otro tipo de materiales que van más allá de la función mecánica. Nos referimos a los sustitutos óseos de tercera generación, que, además de bioactivos, son reabsorbibles: son sustituidos de forma progresiva por hueso neoformado, de modo que regeneran el tejido óseo. Existen rutas de obtención a baja temperatura, que permiten sintetizar una hidroxiapatita más similar a la fase mineral del hueso, con menor cristalinidad, mayor superficie específica y mayor reactividad (*derecha*).



Cerámica de fosfato tricálcico beta obtenida por sinterización a alta temperatura.



Cemento hidráulico de hidroxiapatita obtenido mediante una reacción de fraguado (disolución y precipitación) en condiciones fisiológicas.

CORTESÍA DE LA AUTORA

De forma alternativa, se han desarrollado también cementos hidráulicos basados en fosfatos de calcio, con capacidad de fraguar y endurecer *in vivo*. Nuestro grupo ha investigado diversas formulaciones, que permiten adaptar sus propiedades a necesidades clínicas específicas. El endurecimiento de dichos cementos se basa en una reacción de disolución y precipitación, y la formación de una red de cristales de hidroxiapatita o brushita. Son materiales moldeables o incluso inyectables, lo que les hace indicados para aplicaciones de cirugía poco invasiva. Su capacidad de autoendurecimiento permite aplicarlos en situaciones de cargas moderadas. El desarrollo de espumas de fosfato de calcio autofraguables e inyectables combina las ventajas de las cerámicas macroporosas y de los cementos.

De la osteoconducción a la osteoinducción

En ciertas ocasiones resulta necesario inducir la formación de hueso más allá de la capacidad del tejido receptor. Pensemos en casos de osteoporosis o de fracturas que no consolidan. Un material osteoinductivo induce la diferenciación de células madre a osteoblastos, células formadoras de hueso. Una de las estrategias que se sigue para ello es la combinación de materiales bioactivos con factores de crecimiento o proteínas morfogenéticas óseas como la BMP-2 o la BMP-7, o incluso con células madre. En esta línea, la Unión Europea está financiando, en el marco del proyecto REBORNE, en el que participan la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad Autónoma de Madrid, la realización de estudios clínicos en doce hospitales de ocho países de la UE, para el tratamiento de patologías del ámbito de la cirugía ortopédica y la cirugía maxilofacial mediante células madre mesenquimales junto con biomateriales avanzados.

Por otro lado, el grupo dirigido por Joost De Bruijn, de la Universidad Queen Mary de Londres, ha demostrado que ciertas cerámicas bifásicas muestran una capacidad osteoinductiva intrínseca, atribuible a su composición y microestructura. Esto abre sin duda un nuevo panorama en el diseño de materiales inteligentes para la regeneración ósea.

—Maria Pau Ginebra Molins
Grupo de biomateriales, biomecánica e ingeniería de tejidos
Dpto. de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica
Universidad Politécnica de Cataluña

NEUROCIENCIA

Consciencia condicionada

Algunos pacientes en estado vegetativo muestran signos de aprendizaje

Evaluar el grado real de consciencia de un paciente que ha sufrido lesiones cerebrales graves constituye una tarea conocida por su complejidad. Algunas investigaciones recientes han apuntado la existencia de procesos de aprendizaje simples en sujetos que, según otros tests cognitivos tradicionales, se hallaban en estado vegetativo.

Existen varias pruebas para certificar si un individuo goza de un estado de consciencia mínima (aquel en el que existen indicios de percepción o de movimiento intencionado), pero la interpretación de muchas de ellas es subjetiva. Por ejemplo, hay que decidir si los movimientos de un paciente son deliberados o aleatorios. De hecho, algunos experimentos de neuroimagen con pacientes en estado vegetativo han mostrado resultados inesperados: cuando se les pedía imaginar tareas físicas (jugar al tenis, por ejemplo), algunos sujetos mostraban indicios de actividad en las áreas premotoras del cerebro. En otros, ciertas indicaciones verbales provocaban la activación de sectores relacionados con el habla. Según un estudio reciente, en torno al 40 por ciento de los diagnósticos de estado vegetativo podrían ser incorrectos.

Hace poco más de un año, Mariano Sigman, director del Laboratorio de Neurociencia Integrativa de la Universidad de Buenos Aires, y sus colaboradores recurrieron a experimentos de condicionamiento clásico. Se emitía un tono sonoro y, justo después, se dirigía un leve soplo al ojo del paciente. El soplo provocaba que el sujeto guiñase o desviase el ojo. Pero, tras repetir los experimentos durante una media hora, numerosos pacientes anticipaban el soplo y cerraban el ojo nada más oír el tono sonoro.

Si se aplican dos estímulos exactamente al mismo tiempo, también un caracol acaba por relacionarlos. Pero en este caso los investigadores dejaron transcurrir un lapso de unos 500 milisegundos entre ambos. Según Tristan Bekinschtein, del grupo de investigación sobre pérdida de la consciencia de la Universidad de Cambridge y autor principal del estudio: «Asociar estímulos que se encuentran separados por semejante espacio de tiempo exige un procesamiento consciente». De hecho, basta con demorar el segundo estímulo más de 200 milisegundos para demostrar que ha existido aprendizaje. Al someter al mismo test a sujetos bajo anestesia general (a quienes se considera totalmente inconscientes), estos no mostraron signo alguno de aprendizaje.



¿Responde, o no? Un estudio sobre el aprendizaje en pacientes con lesiones cerebrales pone en cuestión los diagnósticos sobre estados vegetativos.

NISIAN HUGHES, GETTY IMAGES

Los resultados plantean dudas sobre los criterios empleados para diagnosticar un estado vegetativo persistente, aquel en el que la recuperación de la consciencia no se considera probable. Como es bien sabido, la decisión de suspender el soporte vital de un paciente depende a menudo de los pronósticos de recuperación de la consciencia. «Si se demostrase que el sujeto puede aprender, creo que el argumento estaría muy claro», sostiene Bekinschtein.

Los investigadores observaron que, en el 86 por ciento de los casos, la capacidad de aprendizaje pronosticaba con acierto las posibilidades de recuperación después de un año. A tenor de Bekinschtein, la reorganización neuronal que circunvala las regiones cerebrales lesionadas implica que una cierta recuperación no es imposible.

No todos han recibido la noticia con sorpresa. John Whyte, investigador principal de la red de investigación para la rehabilitación neurocognitiva de la Universidad Thomas Jefferson, ya había realizado algunos experimentos de resonancia magnética funcional que le habían llevado a cuestionar los criterios actuales de diagnóstico del estado vegetativo. Whyte admite que tal vez exista una divisoria firme entre los pacientes en estado vegetativo y aquellos mínimamente conscientes. «Pero nuestros instrumentos resultan demasiado toscos para decirnos quiénes se encuentran a cada lado de la línea», añade. O tal vez no resulte tan sencillo asignar categorías tan bien definidas a la consciencia.

No parece probable que los tests de aprendizaje puedan llegar a suplantar a los de resonancia magnética funcional. Joy Hirsch, neurocientífica de la Universidad de Columbia, afirma que la resonancia magnética funcional supone, con mucho, el instrumento más adecuado para la determinación de la consciencia, puesto que revela procesos cognitivos latentes pero inapreciables mediante los tests tradicionales. Sin embargo, tales métodos pueden resultar prohibitivos para muchos investigadores, señalan Bekinschtein, Sigman y sus colaboradores. Gran parte de las pruebas de su estudio se llevaron a cabo en Argentina, donde los equipos de obtención de imágenes cerebrales no abundan tanto como en EE.UU. o en Europa. En palabras de Sigman: «Nuestra prueba requiere solo dos cables y cuesta unos 100 dólares. En términos prácticos, sus consecuencias son de gran peso».

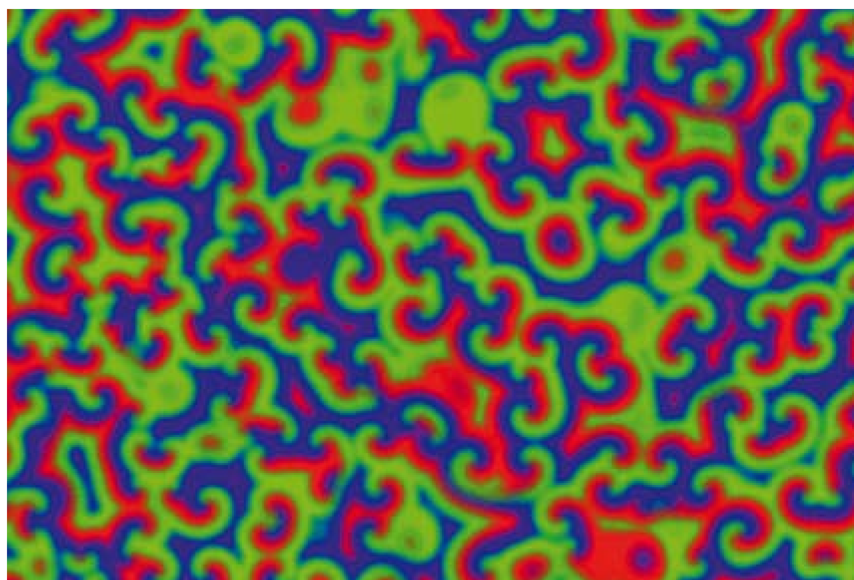
—Katharine Harmon

QUÍMICA

De la genética a la cinética

Fundamental en genética de poblaciones, la ecuación de Fisher resulta útil también en cinética química

Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962) fue un investigador fuera de lo común que no solo realizó contribuciones fundamentales a la ciencia de su tiempo, sino que lo hizo en disciplinas muy diferentes. Entre los matemáticos es considerado como uno de los padres de la estadística moderna, mientras que para muchos biólogos fue el más importante sucesor de Darwin. Su obra *Teoría genética de la selección natural*, publicada en 1930, se ha convertido en el tratado fundacional de la genética de poblaciones. En ella se describe la manera en que evoluciona una población en la que coexisten diferentes alelos, o formas alternativas de un mismo gen. Cada alelo confiere al individuo una determinada adecuación al medio. La selección natural, por su parte, se encarga de que la fracción de individuos con los alelos «más adecuados» crezca frente al resto. Fisher postuló que la variación temporal de la adecuación media de los individuos de una población es igual a la varianza genética en dicha población. En otras palabras, cuanto mayor sea la variedad genética existente en una población, más rápida resultará su adecuación media al entorno.



Simulación por ordenador de la reacción oscilante de Belousov-Zhabotinsky, uno de los modelos analizados por los autores para aplicar la ecuación de Fisher a la cinética química.

WIKIMEDIA COMMONS

Dicho principio se ha convertido en la ley principal de la genética de poblaciones. Lo que reviste mayor interés, sin embargo, es que expresa una relación tan general que resulta aplicable en otros campos. En 2005, John Ross, de la Universidad de Stanford, y sus colaboradores, entre quienes se encontraba Luca Cavalli-Sforza, discípulo de Fisher, sugirieron que una ecuación de Fisher generalizada (EFG) podría cumplirse en otras áreas; por ejemplo, en cinética química, la disciplina que estudia la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas.

El año pasado, en una colaboración entre investigadores de la Universidad de Stanford, el Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo (CSIC) y la Universidad Complutense de Madrid, demostramos la viabilidad de dicha propuesta al aplicar, por vez primera, la ecuación de Fisher generalizada a la cinética química.

Consideremos un proceso en el que participan varias especies químicas. Al reaccionar entre sí, sus concentraciones respectivas variarán a lo largo del tiempo. En nuestro trabajo demostramos que la concentración de cada especie desempeña una función análoga a la que en genética de poblaciones tiene la abundancia relativa de cada alelo. En otras palabras, se satisface una EFG en la que las concentraciones de las especies químicas reemplazan a las abundancias relativas de los alelos.

En nuestro artículo, publicado en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences*, propusimos dos aplicaciones prácticas que se derivan de dicha correspondencia. La primera concierne al uso de la EFG como criterio para evaluar el error de una medida. Al realizar un experimento, sabemos que toda medición sufre de cierto error; pero, en principio desconocemos su magnitud. La EFG se

satisface cuando los errores en las concentraciones son pequeños; sin embargo, a medida que estos aumentan, su cumplimiento se deteriora. En consecuencia, el grado en que se verifica la EFG actúa como umbral de validez y permite detectar medidas experimentales corruptas.

La EFG sirve también para obtener los valores de las constantes cinéticas de un mecanismo de reacción. La idea básica consiste en combinar las medidas experimentales con las ecuaciones teóricas del modelo y emplear el grado de cumplimento de la EFG como criterio en un proceso de optimización. El resultado de dicho proceso arroja el conjunto de constantes cinéticas que mejor se corresponde con los experimentos, lo que permite obtener un modelo mejorado del sistema de reacciones.

Otra de las contribuciones de Fisher consistió en proponer una medida para la cantidad de información que es posible extraer de un conjunto de datos experimentales. Se trata de un concepto muy utilizado en teoría de la información y conocido como «información de Fisher». Si un experimento se encuentra diseñado para maximizar dicha cantidad, mayor es la información que puede obtenerse a partir de sus resultados. Nuestra investigación actual busca la manera de emplear dicho concepto para mejorar los resultados anteriores y determinar con mayor precisión las constantes cinéticas. Hoy en día existe un gran interés por las aplicaciones en química y biología de métodos de teoría de la información, así como de teoría de sistemas o de control. El tiempo dirá que nuevas conexiones se derivarán de tales estudios.

—Alejandro Fernández Villaverde
y Julio Rodríguez Banga
Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo – CSIC

PALEONTOLOGÍA

La diversidad de dinosaurios en Europa

El estudio de yacimientos pirenaicos demuestra que el número de especies de dinosaurios en el continente a finales del Cretácico era muy superior a lo que apuntan ciertas hipótesis sobre su extinción

El Cretácico (de creta, roca abundante en la Europa central), último de los períodos en que se divide el Mesozoico, fue una etapa relativamente cálida, con un alto nivel del mar. Al adentrarse las aguas en las áreas continentales y con el desmembramiento de Pangea, iniciado en el Jurásico, se originaron numerosas masas de tierra aisladas, lo que favoreció el desarrollo de faunas y floras endémicas.

A finales del Cretácico, hace 65 millones de años, se produjo la extinción de los dinosaurios «no avianos», mientras que sus descendientes directos, los dinosaurios «avianos» o aves, sobrevivieron. La explicación más aceptada de esa extinción plantea el impacto de uno o varios grandes meteoritos sobre la superficie de nuestro planeta, aunque existen otras teorías, como un aumento de la actividad volcánica o un cambio climático.

Para entender el modo en que se produjo la extinción resulta imprescindible conocer las últimas faunas de dinosaurios en términos de composición y diversidad a escala global. Fuera de Norteamérica, donde existen numerosos yacimientos del final del Cretácico, el registro fósil y sedimentario disponible de esa edad es, en general, escaso y fragmentario.

Una excepción la constituyen, sin embargo, las sucesiones del sur de los Pirineos, que contienen un registro continuo de estratos de los últimos cinco millones de años del Cretácico, intervalo de tiempo conocido como Maastrichtiense, justo antes de la extinción de los dinosaurios. Esos estratos pertenecían a ambientes costeros, lagunares y fluviales en los que habitaban y desarrollaban su actividad los dinosaurios. Gracias al estudio de los datos aportados por más de un centenar de yacimientos pirenaicos con restos de huesos, huevos y huellas, se ha podido establecer un orden cronológico de los yacimientos. La investigación, publicada en 2009 en la revista *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, ha permitido reconstruir la sucesión de los yacimientos y, en definitiva, la de las faunas de dinosaurios.





Sucesión de estratos del final del Maastrichtiense en el área pirenaica (Puig Pedrós, provincia de Lérida).

Los restos óseos de dinosaurios más abundantes hallados en los Pirineos corresponden a hadrosaurios o dinosaurios con pico de pato. Cada año se llevan a cabo diversas excavaciones durante los meses de verano, en las que se recuperan centenares de restos, como los huesos de la extremidad de hadrosaurio de la fotografía.

Los estudios de diversidad a partir de restos fósiles ofrecen información sobre la diversidad aparente de las faunas (la real es difícil de establecer ya que, entre otros factores, no todos los organismos quedan representados en el registro fósil). Así, en los Pirineos se han hallado a lo largo del Maastrichtiense dinosaurios pertenecientes a distintos grupos: saurópodos titanosaurios (herbívoros cuadrúpedos con largos cuellos y colas, que podían alcanzar tamaños gigantescos), ornitópodos hadrosaurios (herbívoros bípedos o cuadrúpedos, conocidos también como dinosaurios con pico de pato por la peculiar estructura de su morro), terópodos dromeosaurios (carnívoros de tamaño reducido, cubiertos de plumas y emparentados de manera cercana con las aves) y anquilosaurios nodosaurios (herbívoros cuadrúpedos acorazados); se han identificado, además, distintas formas de los tres primeros grupos.

Cabe destacar que en los Pirineos se ha documentado la presencia, hacia la segunda mitad del Maastrichtiense, de ornitópodos lambeosaurios emparentados estrechamente con especies asiáticas. Los lambeosaurios constituyen un grupo de hadrosaurios con vistosas crestas en la cabeza que se han relacionado con la producción de sonidos y con el cortejo. El grupo, muy abundante en Norteamérica y Asia, era prácticamente desconocido en Europa y su descubrimiento en los yacimientos de los Pirineos hace pensar en la existencia de migraciones de faunas desde el continente asiático.

Gracias a los datos de los yacimientos pirenaicos, se ha podido establecer que las faunas de dinosaurios europeas del Maastrichtiense estuvieron constituidas por distintos grupos y formas hasta el momento de su extinción, lo que cuestionaría la hipótesis propuesta por algunos científicos según la cual los dinosaurios europeos se hallaban en declive en ese período y se fueron extinguiendo de manera gradual.

—Violeta Riera
Departamento de geología
Universidad Autónoma de Barcelona

ASTROFISICA

Radiografías espaciales

La NASA prepara el NuSTAR, un nuevo telescopio de rayos X

Algunos de los fenómenos más extremos del universo (agujeros negros, estrellas de neutrones o restos de explosiones estelares) emiten copiosas cantidades de rayos X. Al igual que en una radiografía clínica los rayos X penetran los tejidos y nos permiten observar los huesos, esta radiación también atraviesa las nubes cósmicas de gas y polvo, y puede revelarnos lo que esconde el interior de esas nubes.

Hasta ahora, ninguna misión de la NASA había logrado obtener imágenes de rayos X de alta resolución. La Batería Telescópica de Espectroscopía Nuclear (NuSTAR), cuyo lanzamiento se prevé a principios de 2012, será la primera. NuSTAR cuenta con dos espejos como el que reproducimos aquí, además de con un detector y un mástil desplegable. Sus imágenes gozarán de una sensibilidad 100 veces mayor que la de las misiones anteriores, y su resolución se asemejará a la del ojo humano.

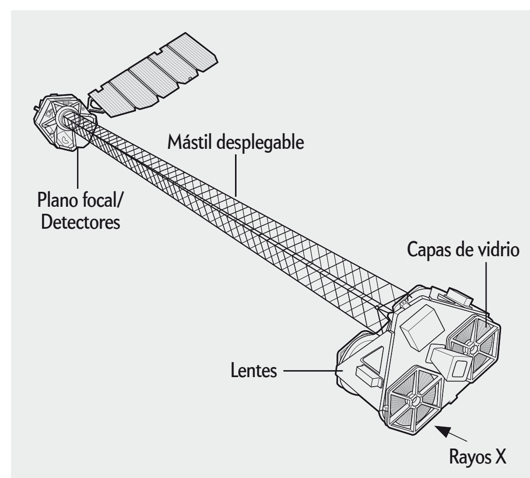
Una cámara de rayos X difiere en gran medida de un aparato diseñado para tomar imágenes en el óptico. Cuando nos miramos de frente en un espejo, la luz visible se refleja en la dirección perpendicular a la superficie del vidrio. Los rayos X, por el contrario, se reemiten en una dirección casi paralela al espejo, a modo de piedras que rebotan en la superficie de una charca. Para registrar esa radiación han de apilarse sucesivas capas de vidrio unas dentro de otras, como si se tratase de vasos de plástico. Cada capa intercepta parte de la radiación, y juntas se combinan para generar una imagen enfocada.

VIOLETA RIERA (*Puig Pedrós*); RODRIGO GAETE (*restos óseos*); FLOTO + WARNER (*NuSTAR, fotografía*); BROWN BIRD DESIGN (*NuSTAR, diagrama*)

Cada elemento óptico del NuSTAR se compone de 133 cáscaras concéntricas de un vidrio tan bien pulido que sus protuberancias no superan la distancia interatómica. Para favorecer la reflexión, el vidrio (del mismo tipo que el usado en las pantallas de los ordenadores portátiles) se halla revestido de centenares de capas alternadas de metal y carbono o silicio. Una vez preparado, una máquina fija cada pieza en el sitio correcto con enorme precisión: su tolerancia es 20 veces más fina que el espesor de un cabello humano. Aunque el telescopio pueda parecer frágil, su construcción le permitirá soportar las turbulencias a bordo del cohete que lo pondrá en órbita.

—Fiona Harrison
Investigadora principal del NuSTAR
Instituto de Tecnología de California
Charles J. Hailey
Equipo de sistemas ópticos del NuSTAR
Universidad de Columbia







EN SÍNTESIS

En la actualidad, las innovaciones energéticas que se antojan más viables probablemente solo logren pequeñas mejoras.

Otra manera de afrontar los problemas energéticos consiste en apostar por propuestas mucho más arriesgadas pero cuyo impacto, en caso de éxito, sería enorme.

Ciertos proyectos investigan fuentes energéticas completamente nuevas. Otros persiguen reducir el consumo de combustibles o su impacto ambiental a niveles sin precedentes.

PROPUESTAS INNOVADORAS PARA LA ENERGÍA

Es muy probable que fracasen, pero en caso de resultar viables cambiarían de manera drástica el panorama energético

GRAN PARTE DE LA INVESTIGACIÓN ACTUAL PERSIGUE UN MAYOR DOMINIO DE las energías renovables y un aumento del rendimiento energético. Tales avances son bienvenidos, desde luego, pero lo más probable es que la mayoría de ellos no repercuta en más que en pequeñas mejoras graduales. Un cambio significativo en la producción energética solo vendrá de la mano de ideas completamente innovadoras.

Durante los últimos años, Gobiernos e instituciones privadas han decidido financiar una notable variedad de propuestas arriesgadas en unas cuantas áreas clave. Si se superasen una serie de obstáculos que se antojan desalentadores y alguna de ellas se materializase en una técnica viable, apta para la producción en masa y asequible desde un punto de vista económico, las recompensas serían cuantiosas.

¿PODRÍA FUNCIONAR?
Las técnicas descritas a continuación han sido evaluadas de la siguiente manera:

VIABILIDAD
comercial

IMPACTO POTENCIAL
en el suministro o uso energéticos

Mínimo ● ○ ○ ○ ○

Máximo ● ● ● ● ●

CHRIS LABROOY *(ilustraciones)*; BROWN BIRD DESIGN *(gráficos)*

CENTRALES

Híbridos de fusión y fisión

Fusión por láser para aprovechar los residuos nucleares

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

Hace años que físicos e ingenieros intentan dominar la fusión nuclear, el mismo proceso que genera energía en el Sol o en una bomba H. Al hacer colisionar isótopos de hidrógeno con la violencia suficiente como para que se fusionen en un núcleo más pesado, se liberan neutrones y energía. Recrear semejante reacción no reviste excesiva dificultad; lo complicado es conseguir que la energía liberada en la reacción supere a la invertida en desencadenarla —un requisito conocido como «ignición»— y llevar a cabo el proceso de manera controlada, de forma que pueda aprovecharse para generar electricidad [*véase* «Las dificultades de la fusión nuclear», por M. Moyer; Investigación y Ciencia, mayo de 2010].

Los científicos del Centro Nacional de Ignición en Livermore han dado con otra posibilidad: emplear la fusión para desencadenar la fisión, el proceso de escisión de núcleos pesados en el que se basan los reactores nucleares ordinarios. Su director, Edward Moses, sostiene que la primera central de este tipo podría estar lista en unos veinte años.

La idea consiste en provocar, mediante pulsos láser muy intensos, la fusión de los átomos de una cápsula emplazada en el centro de una cámara. Después, los neutrones emitidos chocarían contra una envoltura de uranio u otro combustible, donde desencadenarían reacciones de fisión que liberarían una energía cuatro veces mayor que la generada en la cámara. El concepto de emplear la fusión para provocar la fisión con fines pacíficos se remonta a Andréi Sájarov, padre de la bomba H soviética, quien ya lo propuso en la década de 1950.

Si la mayor parte de la energía procede de la fisión, ¿por qué no quedarnos con las centrales nucleares actuales? Un reactor de fisión se basa en una reacción en cadena, en la que los neutrones procedentes de los átomos escindidos provocan a su vez la fisión de otros núcleos. Mantener la cadena requiere emplear uranio o plutonio como combustible, elementos que se utilizan en la fabricación de armas nucleares.

En una central híbrida son los neutrones generados en la fusión los que provocan la fisión, por lo que la necesidad de mantener una reacción en cadena desaparece. Ello permitiría ampliar el abanico de combustibles, a los que podrían sumarse el uranio sin enriquecer, el uranio empobrecido (un voluminoso producto residual del enriquecimiento del uranio) o incluso residuos nucleares, que, de otro modo, deberían almacenarse durante miles de años o someterse a complicados y peligrosos reprocesamientos para poder emplearlos en una central de fisión.

Por otro lado, en un reactor normal se fisiona un pequeño porcentaje de los núcleos del combustible. Según Moses, las centrales híbridas quemarían hasta un 90 por ciento, por lo que quizá bastase un 20 por ciento del combustible que requiere un reactor de fisión ordinario. Una fase de «incineración» en el último decenio de los aproximadamente 50 años de vida de una planta híbrida reduciría los residuos de vida larga de unos 2500 kilogramos a unos 100, si bien a costa de generar menos energía durante esos años.

También se están estudiando las propuestas de fisión inducida por fusión por confinamiento magnético, una alternativa a la fusión por láser. En 2009, expertos de la Universidad de Texas en Austin propusieron un reactor híbrido basado en este principio. En China se están investigando posibilidades para generar el combustible de los reactores actuales y para quemar residuos nucleares.

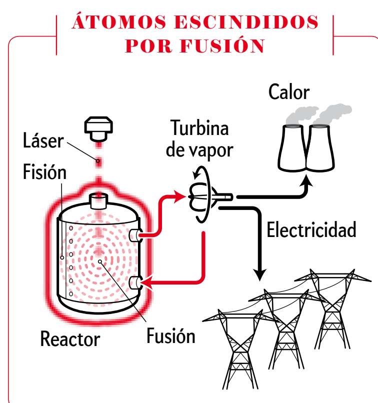
Sin embargo, aun cuando la instalación de Moses lograra la ignición este año, deberían superarse numerosos obstáculos técnicos de gran envergadura antes de conseguir una central. Habría que hallar un método para fabricar, en grandes cantidades y a bajo coste, las pequeñas cápsulas de combustible necesarias para la fusión por láser, las cuales exigen un diseño muy cuidadoso. Para que una central funcione se necesitan unas diez igniciones por segundo. Por ahora, el Centro Nacional de Ignición consigue, en el mejor de los casos, unos cuantos aciertos en el blanco por día.

Además, los enfoques híbridos requieren su propia tecnología; en particular, el manto de fisión, pues ha de soportar descargas de calor y neutrones mucho mayores que las de un reactor ordinario. Las propuestas comprenden desde multicapas de «guijarros» sólidos hasta líquidos compuestos por uranio, torio o plutonio disueltos en sales fundidas.

Los retos son enormes. Moses ha trazado un plan muy ambicioso para superarlos; pero, primero, el centro deberá demostrar que realmente puede lograr la ignición.

—Graham P. Collins

ÁTOMOS ESCINDIDOS POR FUSIÓN



COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

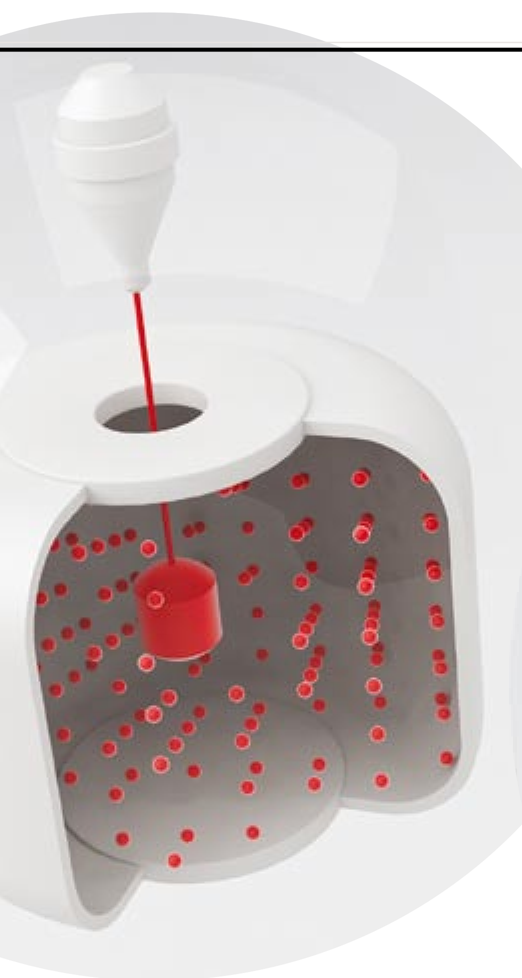
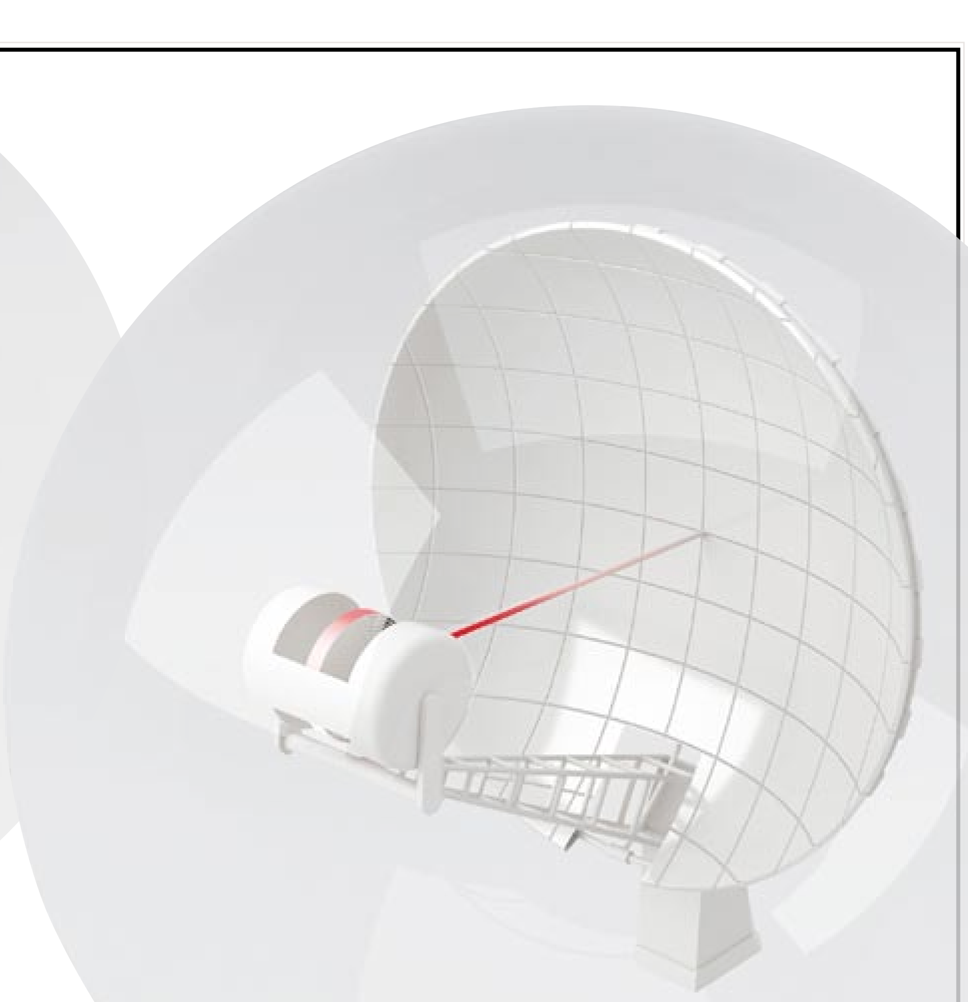
Gasolina solar

Vehículos propulsados por luz solar y dióxido de carbono

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

En una hora, el Sol baña la Tierra con más energía que la que gasta la civilización en un año. Si resultase posible convertir una fracción de ese excedente en combustible líquido, acabaría nuestra adicción a los combustibles fósiles para el transporte. «Los combustibles químicos cambiarían las reglas del juego si pudiéramos obtenerlos a partir de la luz solar de manera eficiente y barata», observa Nathan Lewis, director del Centro Conjunto para la Fotosíntesis Artificial en el Instituto de Tecnología de California.

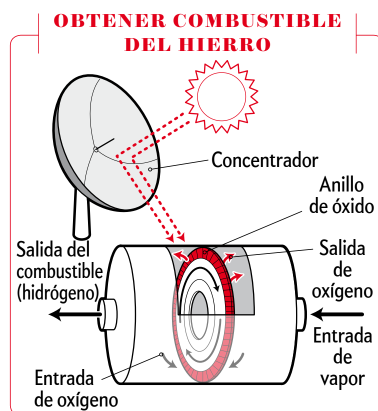
Un proyecto de los Laboratorios Nacionales Sandia emplea un espejo de seis metros de ancho en el desierto de Nuevo México. El dispositivo concentra los rayos solares en una máquina cilíndrica de medio metro de largo, con forma de barril de cerveza y montada frente al espejo. Este enfoca la luz solar a través de una abertura en la pared de la máquina, sobre una docena de anillos concéntricos que rotan una vez por minuto. Los anillos poseen dientes recubiertos de óxido de hierro o de cerio, que cuando rotan hacia la dirección del haz se calientan hasta los 1500 grados Celsius. A esa temperatura, el oxígeno se disocia del compuesto. Cuando los dientes retornan a la parte oscura del reactor, más fría, absorben el oxígeno del vapor de agua o del dióxido de carbono (CO_2) que se insuflan en la cámara, una reacción que produce hidrógeno y monóxido de carbono.

Esa mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono se conoce como gas de síntesis, el componente molecular básico de los combustibles fósiles. Además, el proceso absorbería tanto CO_2 como el que se emitiría al quemar el combustible. Según Arun Majumdar, director de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada y Energía, un sistema de combustibles solares permitiría matar cuatro pájaros de un tiro: un abastecimiento de combustible limpio, mayor seguridad energética, reducción de dióxido de carbono y mitigación del cambio climático.

En la Escuela Politécnica Federal de Zúrich o la Universidad de Minnesota también se desarrollan máquinas productoras de gas de síntesis. Algunas compañías de nueva creación persiguen fines similares: Sun Catalytix genera hidrógeno y oxígeno a partir de un catalizador de bajo coste sumergido en agua y alimentado por luz solar; la empresa Liquid Light insufla CO_2 en una célula electroquímica que lo convierte en metanol, y el mismo Lewis intenta fabricar hojas artificiales a partir de nanohilos semiconductores para disociar el agua en hidrógeno y oxígeno [*véase* «Hojas artificiales», por A. Regalado; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010].

Desde luego, la gran dificultad reside en los problemas prácticos. En Sandia, los dientes se agrietan una y otra vez, lo que dificulta la reacción. «La temperatura oscila constantemente entre los 900 y los 1500 grados Celsius, demasiado para cualquier material», observa Gary Dirks, químico y director de LightWorks en la Universidad estatal de Arizona, quien no participa en el proyecto. El paso siguiente consistirá en obtener un óxido de hierro con una estructura más robusta a escala nanométrica, o encontrar un material mejor para los dientes. Además, el elevado precio de los espejos debería reducirse. Los investigadores de Sandia apuntan que su generador de gas de síntesis puede fabricar combustible a 1,85 euros el litro. «No nos hemos demostrado a nosotros mismos que no podamos hacerlo», afirma James E. Miller, ingeniero químico y uno de los inventores, «pero estamos lejos de lograrlo». *—David Biello*

OBTENER COMBUSTIBLE DEL HIERRO



VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

ELECTRICIDAD

Fotoelectricidad cuántica

Doblar el rendimiento de las placas solares

Las placas solares actuales transforman en electricidad solo el 15 por ciento de la luz que reciben. Una razón se debe a que el rendimiento teórico máximo de una capa de silicio fotoabsorbente asciende al 31 por ciento —las mejores placas logran el 26 por ciento—. Sin embargo, investigaciones recientes sobre cristales semiconductores o «puntos cuánticos» (grumos diminutos de material semiconductor) sugieren que dicho máximo teórico podría elevarse hasta el 60 por ciento.

En una célula ordinaria, los fotones incidentes arrancan electrones del silicio, lo que les permite circular a través de un hilo conductor y establecer una corriente. Por desgracia, una gran parte de los fotones poseen demasiada energía y, cuando chocan con el silicio, este libera «electrones calientes» que pierden con rapidez su energía en forma de calor y retornan a su estado inicial antes de incorporarse al hilo conductor. Si se lograsen atrapar esos electrones antes de que se enfríen, se doblaría el rendimiento de la placa.

Una solución consiste en aumentar el tiempo que los electrones tardan en enfriarse, lo que proporcionaría un margen mayor para capturarlos. El año pasado, Xiaoyang Zhu, de la Universidad de Texas en Austin, y sus colaboradores experimentaron con puntos cuánticos formados por unos pocos miles de átomos. Zhu depositó puntos de seleniuro de plomo sobre una capa conductora de dióxido de titanio. Al iluminarlos, los electrones calientes tardaron hasta mil veces más en enfriarse. Según Phrashant Kamat, de la Universidad de Notre Dame, quien no intervino en las investigaciones, los resultados de Zhu demuestran que el concepto es viable.

Pero enlentecer el enfriamiento de los electrones es solo parte del objetivo. Zhu busca ahora un procedimiento que permita convertir en corriente la mayor cantidad posible de electrones calientes.

En el camino se interponen gran cantidad de obstáculos. Según Zhu, el paso siguiente consiste en entender la física del proceso: describir el enfriamiento de los electrones y su paso al conductor. «Cuando hayamos entendido todo eso, podremos decidir qué materiales hemos de utilizar. Llevará tiempo, pero confío en que lo lograremos.» Los beneficios económicos podrían ser enormes. *—J. R. Minkel*

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

APROVECHAMIENTO DE PÉRDIDAS

Motores térmicos

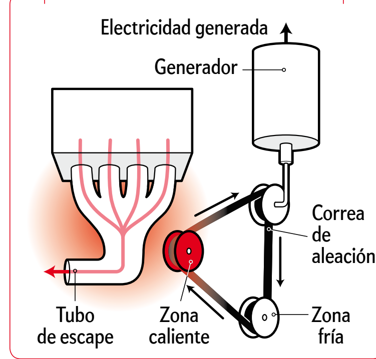
Aleaciones con memoria de forma para reutilizar el calor disipado por automóviles y maquinaria

Desperdiciamos hasta un 60 por ciento de la energía que producimos. En automóviles y centrales eléctricas, gran parte de ella se disipa en forma de calor. Investigadores de General Motors intentan recobrar esa energía con ayuda de ciertos materiales conocidos como aleaciones con memoria de forma, que permitirían convertir ese calor en energía mecánica y después en electricidad. El primer objetivo de Alan Browne, investigador principal, consiste en reciclar el suficiente calor del escape de un vehículo como para accionar el aire acondicionado o la radio.

La idea se basa en recolectar el calor con una correa de hebras finas y paralelas fabricada a partir de una aleación de níquel y titanio que «recuerda» una forma determinada. Tales aleaciones adoptan uno de dos estados; en este caso, uno rígido, a mayor temperatura, y otro flexible, a una temperatura más baja. En el diseño de General Motors, la correa se tensa entre tres poleas. Una de ellas se halla cerca del escape, mientras que otra se encuentra más alejada y, por tanto, en una zona más fría. La correa se contrae al pasar por el vértice caliente y se dilata en el frío, de manera que arrastra un árbol que acciona un generador.

Aunque el prototipo demuestra la validez del principio, los objetivos prácticos aún se encuentran lejos. Por ahora, una pequeña cinta de diez gramos apenas genera unos dos vatios. Browne sostiene que los prototipos comerciales podrían estar listos dentro de unos diez años y que no existen impedimentos para extender la técnica a los electrodomésticos o las torres de enfriamiento de las centrales eléctricas. Si estas aleaciones han abierto la puerta a aplicaciones hasta ahora consideradas imposibles, se debe a que funcionan con diferencias de temperatura tan bajas como diez grados, explica Geoff McKnight, experto en materiales y colaborador de los Laboratorios HRL.

ALEACIONES MOTORAS



El diseño de General Motors destaca por su sencillez, pero sus objetivos se antojan difíciles: los materiales con memoria de forma se tornan quebradizos; insertarles el «recuerdo» de la forma inicial requiere un proceso de tres meses, y construir la correa a partir de las hebras no es sencillo, como tampoco lo es diseñar un dispositivo que se caliente y se enfríe de manera eficiente. Browne no explica cómo atacará todos estos problemas, salvo para apuntar que están experimentando con hebras de varios calibres, otras geometrías de la correa y diferentes maneras para enfriarla y calentarla; según él, todas las variables concebibles.

Sanjiv Sinha, de la Universidad de Illinois, investiga con materiales flexibles que convierten el calor en electricidad. Si esta clase de motores se tornase viable, sus aplicaciones no conocerían fin: desde las torres de enfriamiento y las calderas industriales hasta los radiadores domésticos, frigoríficos, chimeneas y todo tipo de vehículos. Un ahorro energético descomunal que reduciría de manera drástica el consumo de combustibles fósiles. *—Bijal P. Trivedi*

LOCOMOCIÓN

Motores de ondas de choque

Los automóviles con turbinas de gas quintuplicarían la autonomía de los híbridos con motor de pistones

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

HACE MÁS DE UN SIGLO QUE LOS MOTORES de pistones propulsan casi todos los vehículos. Incluso los actuales híbridos emplean pequeños motores de pistones para aumentar la potencia y recargar las baterías. Ahora, la Universidad estatal de Michigan investiga un tipo de motor completamente distinto: conocido como motor de disco de ondas o de onda de choque, prescindiría de pistones.

Según Norbert Müller, profesor de ingeniería mecánica de la Universidad de Michigan y uno de los creadores del ingenio, se trata de un motor compacto, del tamaño de una cacerola y con muchos menos componentes que un motor ordinario, puesto que no necesita pistones, bielas ni bloque de cilindros. Gracias a su bajo peso y a un rendimiento mucho más elevado, permitiría que un automóvil híbrido con frenado regenerativo recorriese, con la misma cantidad de combustible, una distancia cinco veces mayor que ahora. Eso reduciría en el mismo factor las emisiones de dióxido de carbono y abarataría hasta un 30 por ciento los costes de producción.

Por el momento, el quipo de Müller se propone construir un generador de disco de ondas de 25 kilovatios (33 caballos) y esperan que el rendimiento de su primera máquina llegue al 33 por ciento. Si bien la cifra va a la zaga del 45 por ciento del que gozan los motores diésel punteros, los investigadores se muestran optimistas sobre una serie de mejoras que aumentarían el rendimiento hasta el 65 por ciento.

En los motores clásicos de encendido por chispa, una bujía inflama una mezcla de gasolina y aire contenida en una cámara; la explosión empuja un pistón y este hace girar un cigüeñal que, a la postre, acciona las ruedas del vehículo. En un motor diésel, el pistón comprime con fuerza el combustible y el aire, lo que enciende la mezcla; los gases emitidos en la combustión se expanden, impulsan el pistón hacia atrás y este acciona el cigüeñal.

En cambio, en un disco de ondas el proceso de generación de energía tiene lugar en el interior de una turbina en rotación. Imagine un ventilador que descansa en posición horizontal sobre una mesa y rodeado por una pared exterior. Los espacios entre las aspas se llenan de combustible y aire caliente a alta presión. Cuando la mezcla se enciende, la combustión expande los gases del recinto y forma una onda de choque que comprime el aire que llena el espacio restante. Las posteriores reflexiones de la onda contra las paredes comprimen y calientan aún más el aire, que en el momento preciso es liberado a través de la caja. La presión del gas sobre las aspas más la debida a la de los gases que escapan hace girar al rotor, que acciona el cigüeñal.

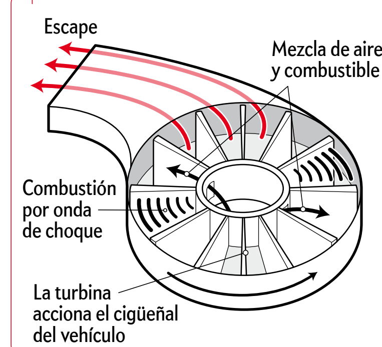
Según Janusz Piechna, el otro diseñador del disco de ondas y profesor en la Universidad de Tecnología de Varsovia, los rotores de ondas comenzaron a investigarse en 1906. De hecho, ya se emplean en algunos sobrealimentadores para coches deportivos. Pero lo difícil es manejar las corrientes gaseosas no estacionarias: predecir el comportamiento no lineal de los flujos intermitentes requiere unas simulaciones numéricas tan complejas que, según Müller, hasta hace poco exigían un tiempo y una resolución tales que no compensaba dedicarse a ellas. Sin embargo, las simulaciones de última generación realizadas en la Universidad de Michigan y otros centros sirven ahora como guía en el diseño de la geometría precisa de las aspas y la sincronización ultrarrápida de la combustión.

«Los rotores de ondas pueden resultar bastante difíciles de poner en práctica», afirma Daniel E. Paxson, quien trabaja en la modelización de flujos en el Centro de Investigaciones Glenn, de la NASA. «En última instancia, el proyecto de Michigan aclarará las cosas», observa con una mezcla de escepticismo pragmático y admiración.

Müller no parece dudar que, si logran construir su motor de disco de ondas, este se abrirá camino hacia vehículos híbridos más ecológicos, desde los ciclomotores hasta los turismos familiares o los camiones de reparto: «Es solo cuestión de tiempo, esfuerzo e imaginación... y dinero, claro».

—Steven Ashley

COMBUSTIÓN SIN PISTONES



ELECTRODOMÉSTICOS

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

Refrigerantes magnéticos

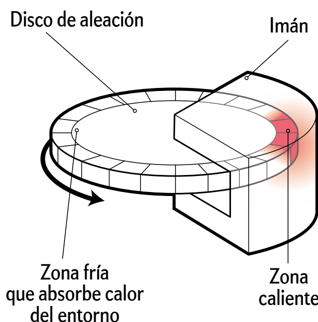
Aleaciones insólitas para enfriar la habitación o los alimentos

Aunque acondicionadores de aire, frigoríficos y congeladores nos refrescan la existencia, lo consiguen a costa de grandes cantidades de energía: en EE.UU. acaparan hasta un tercio del consumo doméstico. Nuevas técnicas basadas en imanes podrían recortar esa cifra de manera espectacular.

La mayor parte de las neveras y aires acondicionados comprimen y descomprimen de manera cíclica un gas o un líquido refrigerante, el cual realiza trabajo a costa del calor que extrae de la habitación o del aparato. El problema reside en que los compresores consumen enormes cantidades de energía; además, cuando se liberan a la atmósfera, la mayoría de los refrigerantes inducen un aumento de temperatura mil veces mayor que el provocado por el dióxido de carbono.

La compañía Astronautics Corporation of America trabaja en un refrigerador basado en imanes y que prescinde de compresores. Todos los materiales magnéticos se calientan en cierta medida cuando se exponen a un campo magnético y vuelven a enfriarse cuando el campo desaparece, un fenómeno conocido como efecto magnetocalórico. Los átomos almacenan el calor en forma de vibraciones; cuando un campo magnético alinea los electrones de un metal e impide que se muevan con libertad, los átomos del metal vibran más y se calientan. Al suprimir el campo, la temperatura disminuye. El fenómeno se descubrió en 1881, pero ha sido ignorado para fines comerciales porque, en teoría, para maximizar el rendimiento harían falta imanes superconductores enfriados mediante técnicas criogénicas. Pero, en 1997, expertos en materiales del Laboratorio Ames del Departamento de Energía de EE.UU. hallaron una aleación de gadolinio, silicio y germanio que mostraba un enorme efecto magnetocalórico a temperatura ambiente. Desde entonces, Astronautics investiga otras aleaciones de ese tipo.

IMANES REFRIGERADORES



La empresa persigue ahora la construcción de un aparato de aire acondicionado que pudiera instalarse en un apartamento de 90 metros cuadrados. Un pequeño disco formado por cuñas porosas fabricadas con una de esas aleaciones pasa por el hueco que deja un iman permanente situado en el mismo plano. En el hueco del imán, el campo magnético es más intenso, por lo que las cuñas se calientan cuando lo atraviesan. Acto seguido, la rotación del disco las aleja del imán y se enfrían de nuevo. Por el interior circula un fluido cuya temperatura también aumenta y disminuye, de manera que el fluido enfriado absorbe calor de la habitación. Los imanes se diseñan de tal modo que el campo no se disperse en el exterior de la máquina y no afecte a los aparatos electrónicos cercanos.

Mientras que en los refrigeradores ordinarios la mayor parte del trabajo lo efectúa el compresor, en los dispositivos magnéticos lo realiza el motor que acciona el rodete. En general, el rendimiento de un motor supera con mucho al de un compresor. Astronautics se ha propuesto disponer en 2013 de un prototipo que reduzca en un tercio el consumo eléctrico para una misma carga de refrigeración. Otra ventaja fundamental reside en que, para transferir el calor, la unidad no necesita más que agua y, como sostiene Steven Jacobs, gerente del centro técnico de Astronautics, «no hay nada más ecológico que eso».

El diseño podría adaptarse a frigoríficos y congeladores, aunque habrá que vencer no pocas complejidades antes de conseguir un prototipo viable. Controlar el flujo del agua por los poros de las cuñas resulta peliagudo, pues el disco gira a una velocidad de entre 360 y 600 revoluciones por minuto. Además, el imán se compone de una aleación de neodimio, hierro y boro de elevado precio, por lo que, para que resulte económicamente rentable, habría que reducir su tamaño lo máximo posible sin que la intensidad del campo magnético se resintiese. «Se trata de una tecnología de alto riesgo, pero con un potencial enorme. Y ese nivel de prestaciones supone un objetivo razonable», afirma Andrew Rowe, ingeniero mecánico de la Universidad de Victoria en Columbia Británica.

Otros expertos trabajan asimismo en técnicas de enfriamiento alternativas. La empresa Sheetal, por ejemplo, investiga un mecanismo que elimina por completo la necesidad de refrigerantes. Para ello, emplea materiales termoeléctricos, los cuales regulan el flujo de calor cuando se hace circular por ellos una corriente eléctrica. De un modo u otro, una reducción en el consumo de combustible y menos emisiones de efecto invernadero para un planeta más fresco.

—Charles Q. Choi



EMISIONES

Carbón (más) limpio

Una sal para absorber el dióxido de carbono de las chimeneas

VIABILIDAD

IMPACTO POTENCIAL

El carbón nos proporciona uno de los recursos energéticos más baratos y abundantes. Pero, como la mayoría de las fuentes ricas en carbono, es también uno de los principales responsables del cambio climático. Se han concebido varios procedimientos para evitar que el dióxido de carbono de las descargas de las plantas térmicas se incorpore a la atmósfera, pero el proceso consume hasta el 30 por ciento de la energía liberada en la combustión del carbón. Ello puede llegar a doblar el coste de la electricidad, lo que convierte la combustión del carbón sin residuos en una técnica muy poco atractiva.

No obstante, la idea resulta lo bastante sugerente como para que la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada y Energía de EE.UU. y otros organismos hayan decidido financiar la investigación encaminada a rebajar ese porcentaje. Un atractivo diseño del Centro de Energías de la Universidad de Notre Dame emplea un nuevo material denominado «líquido iónico» —en esencia, una sal—. Su ventaja principal reside en que captura el doble de dióxido de carbono que otros absorbentes similares. Además, la sal experimenta en el proceso un cambio de fase de sólido a líquido, una transición que libera energía, la cual puede aprovecharse para extraer el carbono del líquido y emplearlo después para otros fines.

«Nuestra modelización demuestra la posibilidad de reducir la energía parásita al 22 o 23 por ciento», afirma Joan F. Brennecker, ingeniera química y directora del centro, «en última instancia, nos gustaría rebajarla hasta el 15 por ciento.» Su equipo intenta ahora demostrar la viabilidad de la técnica a escala de laboratorio.

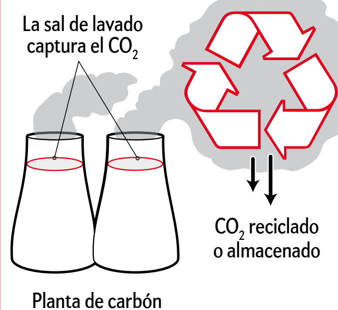
El enfoque parece teórico porque, de hecho, lo es. Según Brennecker, la idea carece de precedentes ya que se trata de materiales descubiertos hace tan solo unos dos años. Su equipo apenas ha empezado a analizarlos y en cualquier momento podrían surgir problemas inesperados. Además, aunque el proceso funcionase en el laboratorio, aún debería demostrarse su viabilidad en una central térmica.

En cualquier caso, si la técnica de lavado funcionase, habría que buscar un lugar para almacenar el carbono. La idea principal considera inyectarlo en el subsuelo, en formaciones de roca porosa (un proceso conocido como «secuestro» y que ya ha sido ensayado, pero que aún debe comprobarse a gran escala). Un enfoque más experimental consistiría en combinar el dióxido de carbono con silicatos, lo que reproduciría el mecanismo natural que fija el dióxido de carbono a la roca carbonatada y lo deja inerte.

También han de considerarse las cuestiones de salubridad y ecológicas ligadas a la minería del carbón y al destino final que se dé a las cenizas tóxicas de la combustión. Todos estos problemas provocan que los ecologistas monten en cólera cuando oyen la expresión «carbón limpio». Con todo, esta materia prima resulta tan abundante y barata que, si cualquier propuesta diera resultado, supondría una ventaja enorme en la lucha contra el cambio climático.

—Michael Lemonick

LAVADO DEL CARBONO



PARA SABER MÁS

Proyectos innovadores financiados por el programa ARPA-E del Departamento de Energía de EE.UU.: **arpa-e.energy.gov**
Fisión activada por fusión: **https://lasers.llnl.gov/about/missions/energy_for_the_future/life**
Fotoelectricidad cuántica: **www.utexas.edu/news/2010/06/17/quantum_dot_research**
Combustibles solares: **pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-2010-1056.ch001**
Motores de onda de choque: **www.nextbigfuture.com/2009/10/wave-disc-engines.html**
Otras propuestas exóticas en **ScientificAmerican.com/may2011/radical-energy**

COSMOLOGÍA

En busca de las GALAXIAS PERDIDAS

Según las últimas estimaciones, el universo observable contiene 200.000 millones de galaxias. ¿Por qué tan pocas?

James E. Geach

Durante su proceso de formación, una galaxia como la Vía Láctea atrae gas denso y frío (*líneas rojas*) y reinyecta gas caliente (*líneas azules*) en el espacio intergaláctico. Al final, la galaxia solo conserva una pequeña parte de la materia prima inicial. El autor y sus colaboradores han creado esta imagen a partir de un código informático de última generación.

JAMES E. GEACH Y ROB CRAIN

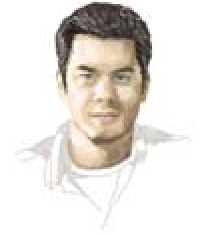
EN SÍNTESIS

Además de la materia y energía oscuras, la materia que llamamos «normal» también esconde sus propios misterios. ¿Por qué solo una mínima parte vive en galaxias? ¿Dónde se halla el resto?

La idea más aceptada afirma que el grueso de la materia bariónica formaría grandes filamentos gaseosos, una fase denominada medio intergaláctico templado-caliente.

La formación de galaxias es, a todas luces, muy ineficiente. Cuando el material se precipita hacia una galaxia, gran parte de él vuelve a ser expulsado en un proceso de retroalimentación.

Las galaxias no pueden considerarse como una entidad fija e inmutable. Antes bien, serían puntos visibles en un inmenso océano de gas que se recicla una y otra vez.



James E. Geach es astrónomo observacional. Estudia la evolución de las galaxias, sus historias de formación estelar y la dinámica del gas frío. Actualmente trabaja como investigador postdoctoral en la Universidad McGill.

La ingente abundancia de galaxias que salpican el cielo nocturno como granos de arena siempre me ha parecido sobrecogedora y fascinante. La imagen óptica más sensible jamás tomada, el campo ultraprofundo del Hubble, muestra unas diez mil galaxias en un área equivalente a la centésima parte de la luna llena. Una densidad semejante implica que, en todo el cielo, debería haber 200.000 millones de galaxias. Y esas serían solo las más brillantes. Probablemente, existen muchas más.

¿De dónde procede esa descomunal cantidad de galaxias? Esa pregunta me impulsó a dedicarme a la astronomía y, desde entonces, ha constituido el tema principal de mi carrera investigadora. Con el transcurso de los años, sin embargo, mi ingenuidad inicial ha quedado atrás. A juzgar por los números, diríamos que la naturaleza fue muy generosa a la hora de engendrar galaxias. Pero semejante conclusión es falsa: si sumamos la materia visible presente en las galaxias actuales, el resultado apenas llega a la décima parte de toda la que fue creada en la gran explosión. ¿Dónde se esconde el resto? ¿Y por qué no ha acabado formando galaxias? Estos constituyen dos de los grandes enigmas de la astronomía contemporánea.

Esta materia perdida no guarda ninguna relación con la materia y la energía oscuras, las sustancias de naturaleza desconocida que constituyen el 96 por ciento del universo. Aquí el problema reside en el 4 por ciento del cosmos que se supone que conocemos bien. Esa porción se compone de materia ordinaria, la misma de la que estamos hechos nosotros y todo lo que nos rodea. Hablamos, en esencia, de bariones, la clase de partículas que incluye a los protones y los neutrones. Haber perdido el rastro de la mayor parte de esta clase de materia supone un misterio dentro de otro. No solo la mayor parte del cosmos es oscuro e inexplicado, sino que, de la minúscula brizna «normal», apenas podemos dar cuenta de una pequeña fracción.

Otra manera de formular el problema es decir que la formación de galaxias se antoja muy ineficiente: algo parecido a un campo sembrado donde tan solo germinase una de cada diez semillas. Los astrónomos llevan años intentando explicar el fenómeno. Y la respuesta que comienza a perfilarse no solo nos obliga a replantearnos cómo se forman, sino el concepto mismo de galaxia. Aquí no se trata, pues, de desentrañar las propiedades de ningún tipo de materia exótica, sino de algo incluso más perturbador: reconocer que aún no comprendemos bien la materia vulgar.

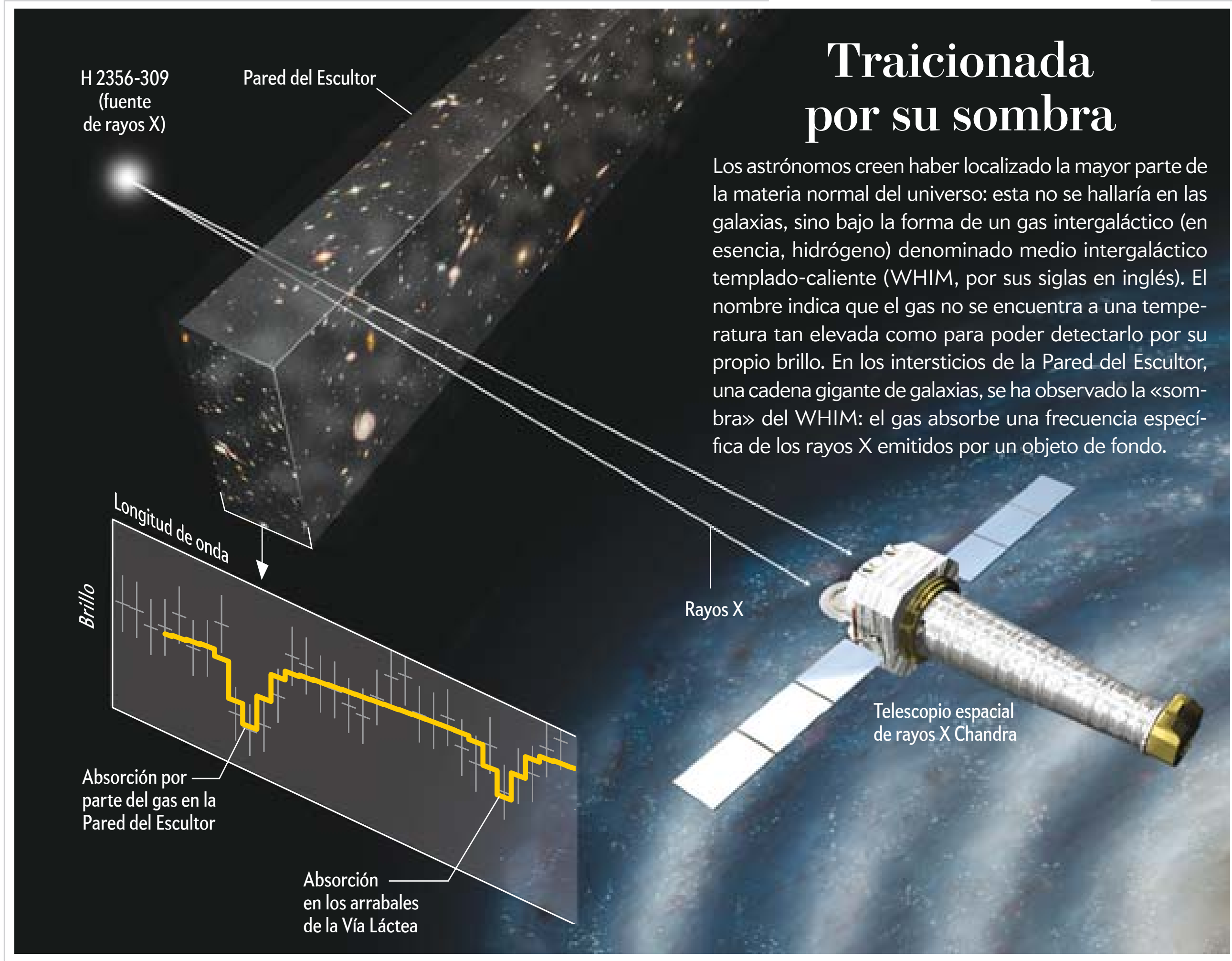
¿DÓNDE ESTÁ LA MITAD DEL UNIVERSO?

Durante décadas, los astrónomos han ido reconstruyendo la historia cósmica y han determinado el contenido del universo en cada fase de su evolución. Como resultado, ha quedado patente que el universo primitivo contenía muchos más bariones que los que detectamos hoy. La cantidad inicial de materia bariónica resulta bastante fácil de estimar a partir del fondo cósmico de microondas, la radiación fósil de la gran explosión. Experimentos recientes, como la Sonda Wilkinson de Anisotropías de Microondas o el observatorio espacial Planck, han medido las pequeñas fluctuaciones en la temperatura de dicha radiación. La distribución de esas variaciones refleja la densidad de materia bariónica presente en el universo antes de que se formasen las galaxias. Una comprobación independiente proviene de las abundancias relativas de helio, deuterio y litio. Estos elementos se sintetizaron durante los primeros minutos de vida del universo en proporciones que dependían de la cantidad total de bariones. Ambos métodos revelan que la materia bariónica presente en el cosmos debería ascender a un 4 por ciento del contenido total de masa y energía del universo actual.

En un principio, los bariones adoptaron la forma de un gas caliente que llenaba el espacio. En las regiones donde su densidad era algo más elevada, la gravedad acumuló más gas y creó nubes de una densidad cada vez mayor, a partir de las cuales se originaron más tarde las galaxias. El gas que llenaba el universo primitivo se detecta gracias al análisis de la luz procedente de cuásares brillantes. Por el momento no necesitamos saber qué es un cuásar: baste decir que se trata de objetos que actúan como focos muy potentes que iluminan el gas primordial que flota en el espacio intergaláctico. Cuando la luz procedente de un cuásar atraviesa una nube de hidrógeno frío y neutro, este absorbe parte de los fotones. Y dado que solo absorbe fotones de una energía determinada, el espectro del cuásar exhibe una depresión delatora, denominada línea de absorción, en la frecuencia correspondiente.

La luz de un cuásar atraviesa cientos de nubes en su camino hasta la Tierra. Cada una de ellas imprime una línea de absorción en una frecuencia ligeramente distinta, la cual depende de la distancia entre la nube y el observador. Al tomar en cuenta todas las depresiones, podemos calcular la cantidad de bariones presentes en las nubes. El resultado indica que, hasta 5000 millones de años después de la gran explosión (hace unos 9000 millones de años), los tenemos localizados a todos. La mayoría flotaba en el espacio intergaláctico y no había formado aún galaxias luminosas [*véase* «Vacíos espaciales», por Evan Scannapieco, Patrick Petitjean y Tom Broadhurst; Investigación y Ciencia, diciembre de 2002].

La mayoría de las galaxias que vemos hoy en día se forjaron durante los últimos 9000 millones de años a partir de ese hidrógeno primordial. Una vez en las galaxias, los bariones se reprocesaron y adoptaron formas diversas: estrellas, remanentes estelares, gas neutro (atómico y molecular), gas ionizado, polvo, planetas, seres vivos... Resulta posible contabilizar la masa de los bariones en cada una de estas formas a partir de su emisión



DON FOLEY, FUENTE: «CONFIRMATION OF X-RAY ABSORPTION BY WARM-HOT INTERGALACTIC MEDIUM IN THE SCULPTOR WALL», POR TAOTAO FANG ET AL. EN *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 714, N.º 2, 22 DE ABRIL DE 2010 (*gráfico*)

en las distintas regiones del espectro electromagnético: la luz visible y el infrarrojo cercano revelan la masa de las estrellas, una línea de emisión muy distintiva de las ondas de radio indica la cantidad de hidrógeno atómico neutro, la luz infrarroja denuncia la presencia de polvo interestelar, etcétera. Gracias a ello, disponemos de un censo de las diferentes fases bariónicas en todas las galaxias cercanas. Y es aquí donde surge la discrepancia: el total explica solo un 10 por ciento del inventario inicial de bariones presente en el universo primitivo. Con toda seguridad, no se han esfumado, sino que se encuentran en el vasto espacio entre las galaxias. Pero ¿por qué no podemos verlos?

EL MEDIO INTERGALÁCTICO TEMPLADO

Sabemos dónde buscar algunos de esos bariones intergalácticos. Los cúmulos de galaxias —agrupaciones muy densas de estos objetos— se encuentran llenos de un gas difuso ionizado, o plasma. El intenso campo gravitatorio del cúmulo acelera los iones hasta que alcanzan grandes velocidades, lo que confiere al plasma una temperatura de cientos de millones de grados, lo suficiente como para que emita rayos X. Contamos con telescopios espaciales, como el XMM-Newton o el Chandra, que detectan de manera rutinaria cúmulos de galaxias gracias a los rayos X que emiten. Pero los cúmulos escasean, por lo que el gas que contienen solo da cuenta de un 4 por ciento adicional de los bariones. Si sumamos los bariones presentes en las galaxias, los cúmulos y el medio intergaláctico, llegamos a la mitad del total. Eso nos deja con el equivalente a unos 500.000 millones de galaxias por descubrir.

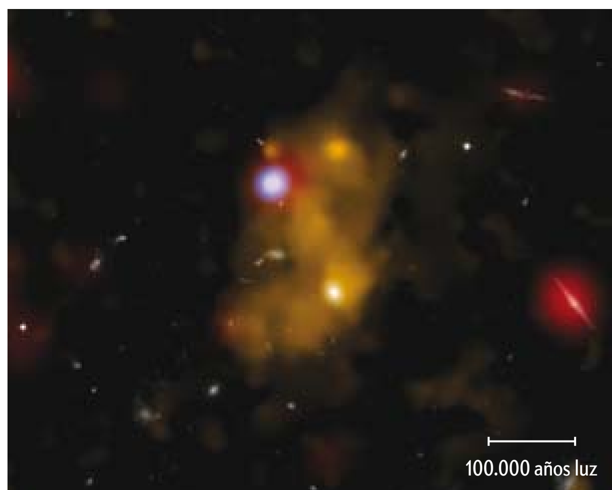
Hace unos diez años, Renyue Cen y Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, Romeel Davé, de la Universidad de Arizona, y sus colaboradores propusieron que los bariones perdidos quizá se hallasen en una fase difícil de detectar. Las propiedades de esa escurridiza componente bariónica se relacionarían con la manera en que la materia —la normal y la exótica— ha evolucionado hasta dar lugar a lo que denominamos estructura a gran escala del universo.

Por efecto de la gravedad, la materia oscura se ha organizado en forma de un gigantesco andamiaje esquelético que entrelaza todo el universo. Los cúmulos de galaxias se encuentran en los nodos más densos de dicha red; fuera de ellos, la mayor parte de las galaxias se congrega en grupos menos densos o se alinea en largos filamentos. El gas intergaláctico cae hacia los filamentos y, a medida que lo hace, las simulaciones por ordenador sugieren que se calienta mediante ondas de choque hasta temperaturas de entre 100.000 y decenas de millones de grados Kelvin. Aunque eso parece bastante, resulta tibio para los estándares del gas intracumular. Si bien a esa temperatura aún permanece ionizado, esta no alcanza para originar emisiones de rayos X. Cen, Ostriker y Davé dieron a este material el nombre de «medio intergaláctico templado-caliente» (WHIM, por sus siglas en inglés, que también significa «capricho» en esa lengua). De confirmar su existencia, tal vez lográsemos

determinar la ubicación y las condiciones físicas de los bariones perdidos.

La manera más prometedora de detectar el WHIM consiste en buscar trazas de elementos como el oxígeno o el nitrógeno, ya que estos absorben luz ultravioleta y rayos X de frecuencias muy características. Se trata de la misma técnica de líneas de absorción utilizada para censar las nubes de hidrógeno en el universo primitivo: buscar depresiones en el espectro de los cuásares que iluminan el WHIM. Ya se han obtenido algunos resultados sugerentes. En el ultravioleta, el Telescopio Espacial Hubble y el difunto Explorador Espectroscópico del Ultravioleta Lejano (FUSE) han detectado la absorción debida a oxígeno fuertemente ionizado. Los primeros indicios se obtuvieron hace algo más de una década, cuando la idea del WHIM aún era novedosa: Todd M. Tripp, ahora en la Universidad de Massachusetts en Amherst, y Blair D. Savage, de la Universidad de Wisconsin-Madison, midieron la absorción por oxígeno ionizado en el espectro ultravioleta del cuásar PG 0953+415. Además, gracias a los avances en instrumentación (el detector más reciente es el Espectrógrafo de Orígenes Cósmicos, a bordo del Hubble), durante la última década se han efectuado más observaciones. Sin embargo, aunque los sistemas con oxígeno altamente ionizado parecen bastante comunes, este ion solo da cuenta de las zonas relativamente frías del WHIM. Para estudiar el gas más caliente y abundante hay que buscar la absorción por parte de especies aún más ionizadas.

Taotao Fang, de la Universidad de California en Irvine, y sus colaboradores han usado los telescopios de rayos X Chandra y XMM-Newton para escudriñar los intersticios de la Pared del Escultor, una inmensa cadena de galaxias en el universo local, el territorio ideal para la caza del WHIM. Detectaron líneas de absorción de oxígeno tan ionizado que había perdido casi todos los electrones. La estimación correspondiente de la densidad de bariones en esta componente del WHIM coincide con los resultados de las simulaciones cosmológicas.



Grumo cósmico: Una bola de hidrógeno (*amarillo*) parece ser el residuo de la formación de una galaxia masiva.

Aunque alentadores, tales resultados apenas arañan la superficie del misterio. Las observaciones se antojan complicadas: la señal del WHIM es débil y, por lo general, se trabaja en los límites técnicos de la instrumentación. Incluso cuando se detecta la absorción, han de realizarse numerosas suposiciones sobre el gas para extrapolar las conclusiones al conjunto del WHIM. Y más importante aún: la técnica de líneas de absorción se basa en la localización fortuita de los cuásares, objetos que no destacan por su abundancia. Todo ello confiere a la caza del WHIM un aire de lotería. Con todo, creemos saber dónde buscar los bariones perdidos y cómo detectarlos, por lo que el estudio del WHIM constituye un campo muy activo de la investigación actual.

LA LUCHA POR LOS BARIONES

La existencia del WHIM explica, hasta cierto punto, por qué la formación de galaxias resulta tan ineficiente. La evolución de la estructura a gran escala del universo dio lugar a un gas demasiado tenue y caliente como para que todo él acabase en las nubes densas y frías a partir de las cuales se originaron las galaxias. Desde luego, algunos de los bariones sí lo consiguieron; si no, no estaríamos aquí. Y podemos concluir algo más: la formación de galaxias fue mucho más eficiente en el pasado. Hace 8000 millones de años, la tasa de génesis estelar superaba en 10 o 20 veces a la actual; la mayoría de las galaxias que hoy vemos nacieron en esa época. Para comprender ese descenso tan brusco en la tasa de creación de galaxias nos hemos visto obligados a replantearnos los modelos que explican su formación.

En principio, la receta para crear una galaxia no presenta demasiadas dificultades. De acuerdo con un modelo de los años noventa concebido por Simon D. M. White, del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, y Carlos Frenk, de la Universidad de Durham, las galaxias se gestan en el interior de grandes acumulaciones de materia oscura, denominadas halos, cuya atracción gravitatoria absorbe el gas circundante, de modo similar al agua que se precipita por un desagüe. Según este modelo, parte del gas se calienta mediante ondas de choque al zambullirse en el halo; luego se enfría y emite radiación, lo que le permite aglomerarse en una estructura cohesionada. Una vez en la galaxia, el gas puede enfriarse aún más, agregarse y dar lugar a las nubes de hidrógeno molecular que, tras su colapso gravitacional, alcanzan la densidad necesaria para formar estrellas. Por su parte, las grandes galaxias nacen a partir de la fusión de hermanas menores.

Sin embargo, los propios White y Frenk reconocían grietas en su modelo. Por ejemplo, no todo el gas que fluye hacia las galaxias tendría por qué calentarse a altas temperaturas mediante choques. Pero la idea básica de una acreción por parte de los halos de materia oscura supuso un marco teórico sólido para entender los principios de la génesis galáctica. El campo ha avanzado de manera notable durante los últimos veinte años y los flujos de gas se han estudiado con un detalle cada vez mayor. Los últimos modelos por ordenador de alta resolución, que calculan la evolución termodinámica del gas en las simulaciones cosmológicas, indican que, en el universo primitivo, parte del gas que fluía hacia los discos galácticos jóvenes lo hacía en forma de corrientes relativamente frías (de entre 10.000 y 100.000 grados) y estrechas (unos pocos miles de años luz de anchura). Estos flujos fríos habrían penetrado a través del gas caliente del halo para contribuir al crecimiento galáctico. Hasta ahora, nadie ha visto ese proceso en acción: los detalles de la acreción de gas hacia las galaxias se muestran complicados; además, no todas las simulaciones arrojan los mismos resultados. Pero, hechas estas salvedades, hoy se acepta que las galaxias se forman a partir de la acumulación gravitatoria de gas primordial, ya sea gas que primero se calienta y luego se enfría, o bien gas que jamás se calienta.

El problema del modelo reside en que el flujo de gas debe contrarrestarse de alguna manera; si no, las galaxias acabarían

alcanzando proporciones monstruosas. Sabemos que las galaxias abarcan cierto intervalo de masas. Los primeros modelos reproducían dicho intervalo bastante bien, pero ello se debía a que empleaban un valor para la densidad bariónica promedio que ascendía a la mitad del que calculamos hoy. Al realizarse nuevas medidas de la fracción bariónica y revisarse ese valor a la alza, se actualizaron las simulaciones. Los universos sintéticos que estas predecían se encontraban plagados de galaxias gigantescas que no se ven en la naturaleza.

Por otra parte, los modelos apuntan a una gran profusión de pequeños halos de materia oscura que se aglutinarían en objetos cada vez mayores. Pero las galaxias reales no se ajustan a esa pauta. En concreto, no se observan tantas galaxias pequeñas como predicen los modelos y, además, las galaxias mayores parecen haberse formado de manera rápida y eficiente, no a partir de la unión gradual de fragmentos menores.

Los modelos obviaban algún ingrediente esencial: algo que regulase el enfriamiento del gas y la formación estelar en las galaxias. Dicho proceso debería rebajar la eficiencia de las galaxias pequeñas a la hora de formar estrellas y, al mismo tiempo, limitar el tamaño de las galaxias masivas. Al respecto, se han considerado varias opciones. Conocidos en conjunto como mecanismos de retroalimentación galáctica, estos procesos contrarrestarían, o incluso invertirían, el colapso gravitatorio del gas hacia la galaxia y, por consiguiente, reducirían el número de estrellas. Tales mecanismos incluyen las explosiones de supernova, los vientos y la radiación ultravioleta emitidos por las estrellas, así como la tremenda energía liberada durante el crecimiento de los agujeros negros supermasivos que habitan en el núcleo de las grandes galaxias [*véase* «La reacción de los agujeros negros», por Wallace H. Tucker, Harvey Tananbaum y Andrew Fabian; Investigación y Ciencia, mayo de 2007]. En las galaxias de mayor tamaño, los agujeros negros constituirían el mecanismo de retroalimentación dominante; en los sistemas menores, destacarían las supernovas y los vientos estelares.

Lo que comparten todos esos procesos es que reinyectan energía en el medio circundante. Así, las galaxias pueden sofocar el flujo de gas desde el exterior, impedir que el que ya se ha acumulado se transforme en estrellas y, en casos extremos, expulsar bariones y devolverlos al espacio intergaláctico. Las simulaciones que tienen en cuenta la retroalimentación reproducen con mucha mayor fidelidad la variedad observada de galaxias. Además, la retroalimentación no solo desempeña una función crucial en la evolución galáctica, sino que reabastece, recalienta y enriquece el WHIM. Mediante este ciclo de calentamiento y enfriamiento, los bariones circulan entre el espacio intergaláctico y las estrellas y el gas de las galaxias. El crecimiento galáctico dependería de un delicado equilibrio que se ha decantado hacia un lado u otro a lo largo de la historia cósmica. Comprender esta lucha por los bariones supone un cambio en nuestra manera de concebir la formación de galaxias.

GRUMOS CÓSMICOS

El estudio del enfriamiento del gas y la retroalimentación ha constituido un tema central de la investigación astrofísica durante la última década. Pero, sin datos empíricos, resulta imposible verificar los modelos. La presencia de material frío que fluye hacia las galaxias se revelaría por el brillo difuso que emite el hidrógeno al enfriarse; la retroalimentación se deduciría a partir de la emisión infrarroja generada por una formación estelar intensa, también gracias a los rayos X y ondas de radio procedentes de las cercanías de un agujero negro supermasivo.

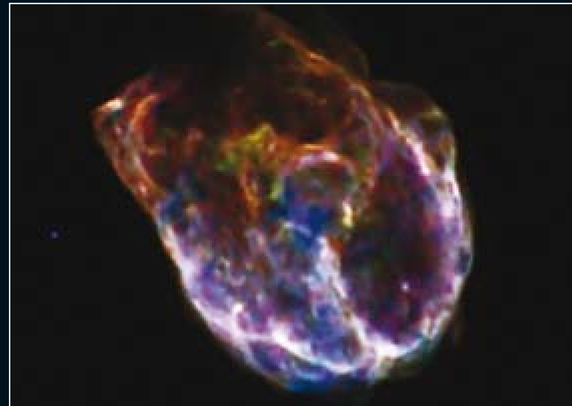
RETROALIMENTACIÓN

Expulsión de materia

¿Por qué las galaxias contienen una fracción tan pequeña de la materia bariónica? No solo la mayor parte se encuentra en el WHIM, sino que las galaxias limitan su propio crecimiento: el gas intergaláctico que cae hacia ellas se agrega en estrellas y agujeros negros; después, esos objetos devuelven parte de la energía al medio interestelar y al intergaláctico, lo que contrarresta la caída de gas. Entre los procesos de retroalimentación destacan los vientos estelares, las explosiones de supernova y los chorros eyectados por los agujeros negros.



ESTRELLA



SUPERNOVA

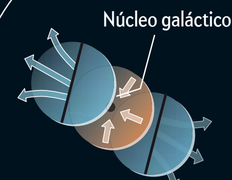


AGUJERO NEGRO

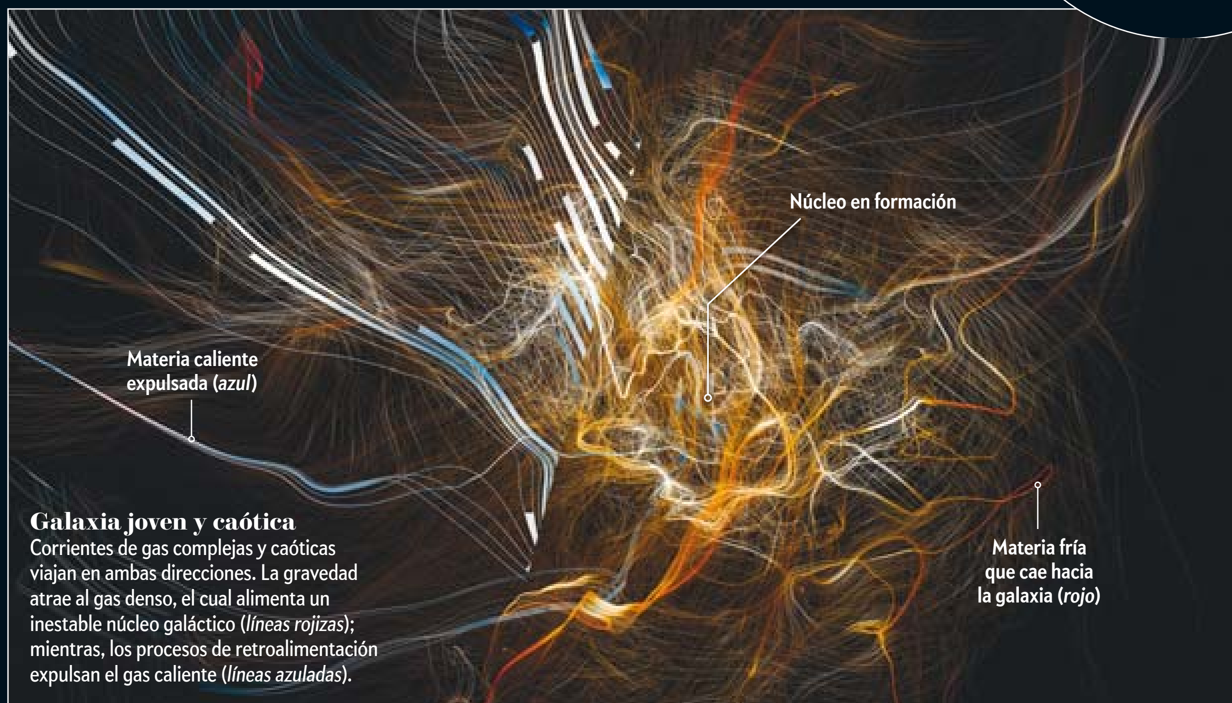
CORTESÍA DE NASA/ESA/Y. NAZÉ, UNIVERSIDAD DE LIEJA Y Y.-H. CHU, UNIVERSIDAD DE ILLINOIS (*estrella*); CORTESÍA DE NASA/CXC/NCSU/K. J. BORKOWSKI ET AL. (*supernova*); CORTESÍA DE NASA/CXC/CFA/R. KRAFT ET AL. (*agujero negro*)

Un remolino turbulento

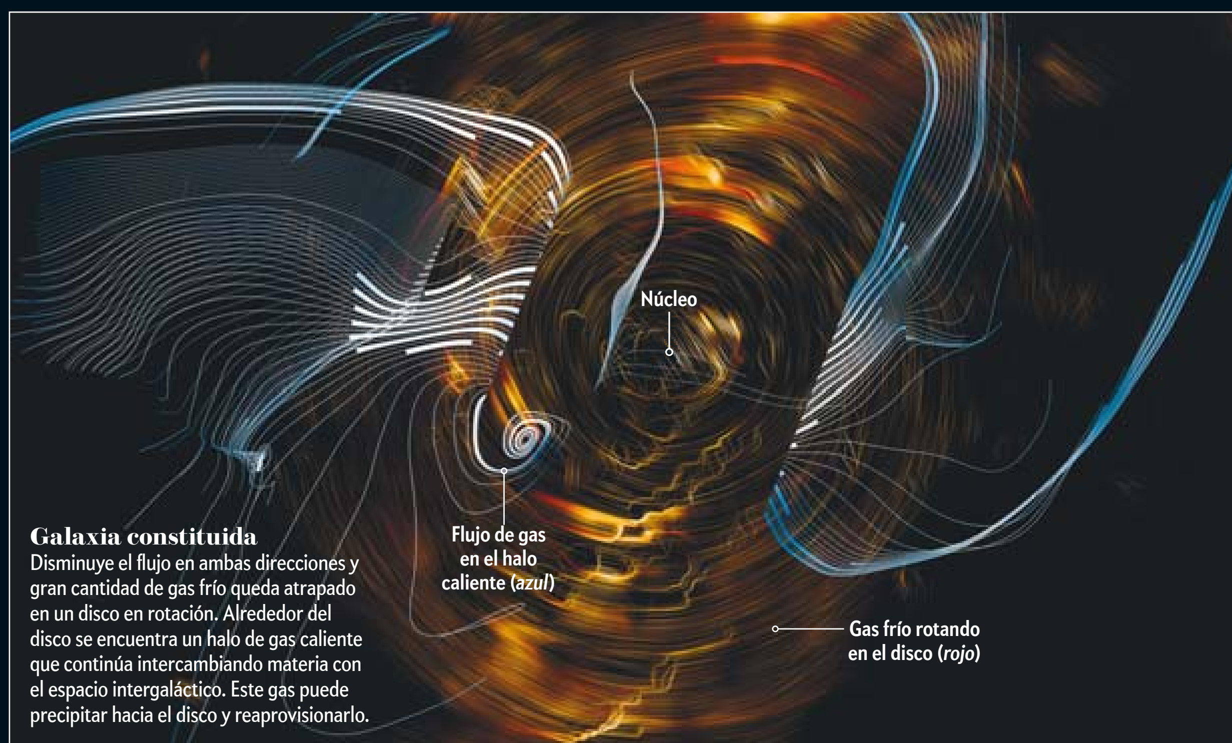
La mayoría de la gente percibe las galaxias como majestuosas bolas o espirales de estrellas que flotan en el vacío. Sin embargo, se trata en realidad de sistemas que intercambian sin cesar material con el entorno. La materia bariónica fluye a través de las galaxias; en cualquier momento, la mayoría de los bariones se halla en el espacio intergaláctico. La simulación que reproducimos aquí muestra una galaxia similar a la Vía Láctea hace 10.000 millones de años (*arriba*) y en la actualidad (*abajo*).



Las ilustraciones muestran líneas de flujo que emanan de tres planos distintos



Galaxia joven y caótica
Corrientes de gas complejas y caóticas viajan en ambas direcciones. La gravedad atrae al gas denso, el cual alimenta un inestable núcleo galáctico (*líneas rojizas*); mientras, los procesos de retroalimentación expulsan el gas caliente (*líneas azuladas*).



Galaxia constituida
Disminuye el flujo en ambas direcciones y gran cantidad de gas frío queda atrapado en un disco en rotación. Alrededor del disco se encuentra un halo de gas caliente que continúa intercambiando materia con el espacio intergaláctico. Este gas puede precipitar hacia el disco y reaprovisionarlo.

JAMES E. GEACH

En fecha reciente, puede que hayamos logrado dar cuenta de ambos procesos.

Hace unos diez años, Charles Steidel, del Instituto de Tecnología de California, y sus colaboradores descubrieron una nueva clase de objeto que parecía satisfacer todas las condiciones observacionales del enfriamiento: los grumos Lyman-alfa. Aquí «grumo» (*blob*) es la palabra técnica, «Lyman-alfa» es el nombre de una de las líneas de emisión del hidrógeno. El término hace referencia a nubes de gas brillante de hasta 300.000 años luz de diámetro —bastante mayores que la Vía Láctea, cuyo diámetro asciende a unos 100.000 años luz—, por lo que se contarían entre los objetos luminosos más extensos del universo primitivo. Desde entonces, se ha descubierto una gran cantidad de ellos. Y el brillo en Lyman-alfa se ajusta de manera asombrosa a las predicciones de la señal radiativa que uno esperaría de un gas frío que fluye hacia una galaxia joven.

Sin embargo, los procesos astrofísicos que emiten en Lyman-alfa abundan. También la luz ultravioleta o un viento a escala galáctica podrían inyectar energía en los grumos y hacerlos resplandecer. Con el telescopio Chandra, mis colaboradores y yo hemos observado que muchos grumos contienen galaxias con agujeros negros que emiten gran cantidad de rayos X. A menudo, esa actividad se acompaña de formación estelar intensa, delatada por la emisión infrarroja de las capas de polvo que envuelven y oscurecen las regiones donde nacen las estrellas. Nuestro grupo ha demostrado que la energía liberada en tales procesos basta para alimentar la emisión en Lyman-alfa. Por tanto, cabe la posibilidad de que el brillo de los grumos no se deba al enfriamiento, sino al calentamiento del gas.

Por tanto, en lugar de aclarar las cosas, los grumos no han hecho más que enturbiarlas un poco. El reto actual consiste en idear nuevas observaciones para averiguar lo que en realidad ocurre. En cualquier caso, los grumos constituyen justo el tipo de objeto que podría explicar una de nuestras principales lagunas relativas al proceso de creación de galaxias.

Además, la observación de que las inmediaciones de las galaxias jóvenes y activas se encuentran inundadas de radiación quizás ayude a resolver otro problema de los modelos de formación galáctica. Las simulaciones de materia oscura de muy alta resolución predicen que una galaxia como la Vía Láctea tendría que hallarse acompañada por miles de galaxias enanas zumbando a su alrededor, como abejas en una colmena. Aunque la Vía Láctea sí posee unos pocos satélites enanos, su número resulta muy inferior al que predicen las simulaciones [*véase* «Galaxias enanas y materia oscura», por P. Kroupa y M. Pawlowski; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. Sin embargo, quizá las galaxias enanas sí se formasen en el universo primitivo, pero después su galaxia anfitriona las haya ahogado con radiación y vientos. Ese bombardeo habría despojado a las galaxias enanas de sus bariones, sin dejar más que un amasijo estéril de materia oscura que, desde entonces, remolonearía en torno a la galaxia anfitriona. Las galaxias mayores pueden llegar a una tregua en su lucha por los bariones, pero las más pequeñas sucumben sin remedio.

¿QUÉ ES UNA GALAXIA?

Tradicionalmente, se piensa en las galaxias luminosas como en «universos isla», tal y como los denominó Immanuel Kant. En cierto sentido, se trata de una noción correcta. Pero esas brillantes islas de luz no serían sino la punta visible de un inmenso iceberg, aún esquivo, de materia bariónica. Este material impregna el universo, distribuido a lo largo de (y moldeado por) una gigantesca estructura oscura subyacente, la cual evoluciona sin cesar bajo el efecto de la gravedad.

Todos los bariones partieron del mismo estado: un gas primordial caliente que, con gran rapidez, formó hidrógeno, helio y pequeñas trazas de deuterio y litio. Los objetos que llamamos galaxias nacieron a partir de esa materia prima, la cual se agregó en núcleos más densos por obra de la gravedad. Pero tales estructuras no forman grupos estables de bariones. El material fluye entre ellas como parte de un largo ciclo que lleva en marcha desde la gran explosión. Las influencias opuestas de la gravedad y la retroalimentación provocan que el gas se enfríe y caiga hacia las galaxias para luego salir expulsado de ellas. Las simulaciones recientes de Rob Crain, de la Universidad Swinburne de Tecnología en Melbourne, Benjamin Oppenheimer, de la Universidad de Leiden, y sus colaboradores sugieren que hasta un 50 por ciento de los bariones que hoy residen en las galaxias del universo local podrían haber circulado por el medio intergaláctico al menos una vez, si no varias. También los bariones de los que están hechos nuestros cuerpos habrían participado en ese ciclo durante casi 14.000 millones de años: la materia de su uña quizá se haya creado en estrellas de otras galaxias y haya permanecido miles de millones de años exiliada en el espacio intergaláctico antes de venir a parar a nuestro sistema solar. Usted es solo una fase efímera, un breve anfitrión, para esta extraña sustancia que llamamos «normal».

El concepto de ciclo bariónico sustenta una nueva visión de la evolución galáctica, según la cual las galaxias constituyen una pequeña componente de la evolución a gran escala del medio intergaláctico. En otras palabras, el universo bariónico se compone, sobre todo, de gas, no de galaxias. El medio intergaláctico desempeña el papel de un campo de batalla: las galaxias, que nacen en el fragor de ese torbellino, no constituyen sino una etapa en un ciclo continuo de reprocesamiento de bariones. De hecho, en cualquier momento que escojamos, la mayoría de los bariones en el universo se encuentran fuera de las galaxias.

Acaso de forma romántica, prestamos a las galaxias una atención especial: la Vía Láctea, nuestro hábitat cósmico, supone un inmenso, brillante y complejo hogar en medio de la oscuridad. Desde un punto de vista antrópico, tenemos la suerte de existir en una época en que los bariones que forman la Tierra y todo lo que hay en ella han adoptado una forma fría y estable. Pero eso no continuará para siempre. La muerte del Sol dentro de unos cinco mil millones de años incinerará los planetas interiores, evaporará los exteriores y, poco a poco, dispersará de nuevo el detritus de elementos pesados hacia el medio interestelar. A no ser que los humanos desarrollemos la tecnología necesaria para franquear los confines del sistema solar, las cenizas de todo objeto sobre la Tierra están destinadas a ser devueltas al cosmos y a perpetuar el ciclo.

PARA SABER MÁS

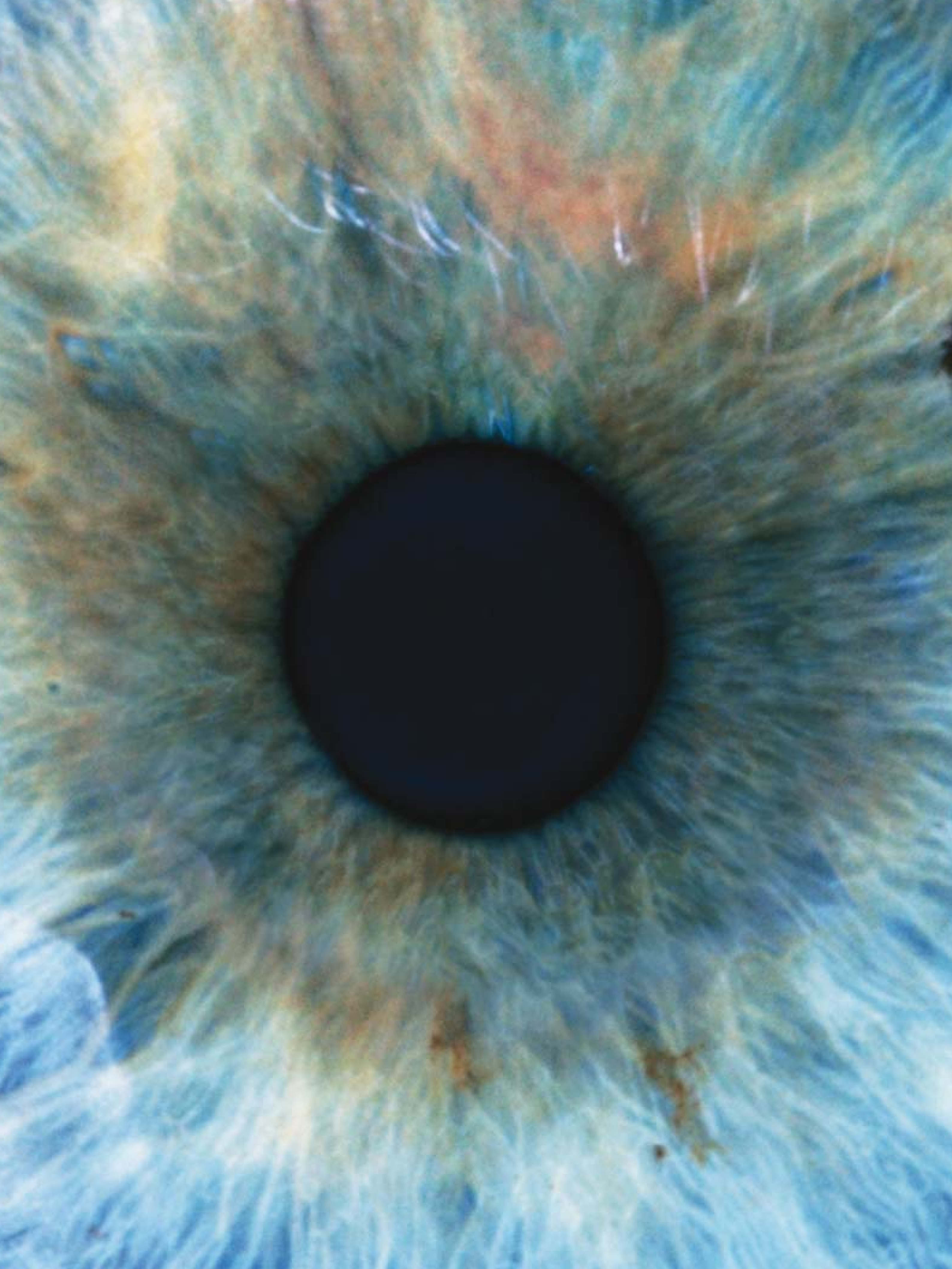
The search for the missing baryons at low redshift. Joel N. Bregman en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 45, n.º 1, págs. 221-259, septiembre de 2007. Disponibe en **arxiv.org/abs/0706.1787**

The Chandra deep protocluster survey: Ly-alpha blobs are powered by heating, not cooling. James E. Geach et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 700, n.º 1, págs. 1-9, julio de 2009. Disponible en **arxiv.org/abs/0904.0452**

The intergalactic medium over the last 10 billion years—I. Lyman-alpha absorption and physical conditions. Romeel Davé et al., en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 408, n.º 4, págs. 2051-2070; noviembre, 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1005.2421**

Página web del autor, con imágenes y enlaces: **www.physics.mcgill.ca/~jimgeach**

Simulación tridimensional del nacimiento de una galaxia: **scientificamerican.com/may2011/geach**



NEUROCIENCIA

Un órgano oculto en los ojos

Nuestro organismo ajusta los ritmos circadianos merced a ciertas neuronas especializadas de los ojos. Los estudios en curso podrían dar lugar a nuevos tratamientos contra la depresión invernal y otros trastornos

Ignacio Provencio

CHRISTIAN WEBER, GALLERY STOCK

En los años veinte del siglo xx, Clyde E. Keeler, doctorando de la Universidad de Harvard, descubrió dos hechos sorprendentes en unos ratones criados por él en el desván donde vivía. Uno, que toda su progenie era completamente ciega. Dos, que a pesar de su invidencia, las pupilas de esos ratones todavía se contraían en respuesta a la luz ambiente, si bien a un ritmo más lento que en los ratones con visión normal.

Las observaciones de Keeler se comprobaron muchos años después. Se demostró que los ratones transgénicos cuyas retinas carecían de los bastones y conos implicados en la visión seguían respondiendo a los cambios de luz mediante el ajuste de su reloj circadiano (el temporizador interno que sincroniza la actividad hormonal, la temperatura corporal y el sueño). Los animales experimentales realizaban las actividades diurnas típicas a la luz del día, y las propias de la noche en la oscuridad. Podían hacerlo a pesar de que sus retinas carecían de las células fotorreceptoras que permiten a los vertebrados la formación de imágenes; pero la extirpación quirúrgica de los ojos abolía esa capacidad. El fenómeno se presenta en numerosos mamíferos, entre ellos los humanos; en experimentos recientes se ha comprobado que ciertas personas cie-

gas ajustan sus relojes circadianos y contraen sus pupilas en respuesta a la luz.

Una explicación de esa aparente paradoja sería que los fotorreceptores en el ojo imprescindibles para la visión no intervienen en la temporización de la actividad cotidiana, sino que lo hacen otros fotorreceptores. Pero hasta hace muy poco, la idea de que los ojos albergaran fotorreceptores distintos de los conos o los bastones se antojaba absurda, ya que la retina constituye uno de los tejidos estudiados más a fondo de nuestro cuerpo.

Empero, existen ahora datos convincentes de que los ojos de los mamíferos sí cuentan con fotorreceptores especializados no implicados en la formación de imágenes. En estas células, las moléculas fotodetectoras difieren de las de los conos y bastones, y las células mismas se conectan con regiones cerebrales distintas de las de aquellos. Así, igual que los oídos nos proporcionan la audición y, además, el sentido del equilibrio, cada uno de nuestros ojos integra dos órganos.

Ese descubrimiento podría ayudar a quienes tienen dificultades para ajustar su reloj biológico. El *jet lag* constituye la manifestación más obvia de una desincronía circadiana, un desfase horario entre los ciclos de noche y día y nuestro reloj biológico interno como consecuencia de los viajes rápidos. Se cree que el trabajo en turno de noche, una forma autoimpuesta de ese desajuste, puede elevar el riesgo de enfermedades cardiovasculares, trastornos gastrointestinales, cáncer o síndrome metabólico (dolencia que puede desembocar en diabetes II e ictus). Algunos de los más lamentables accidentes industriales de todos los tiempos, como el embarrancamiento del petrolero *Exxon Valdez*, la explosión de la planta química de Union Carbide en Bophal en 1984 y el accidente nuclear de Three Mile Island en 1979, acontecieron durante el turno de noche, cuando la vigilancia de los trabajadores era menor. Además, millones de personas que residen en latitudes extremas, sean septentrionales o meridionales, sufren de un trastorno afectivo estacional, una forma de depresión, a menudo grave, que también parece asociada a la deficiencia de luz durante los breves días del invierno. El conocimiento que se va adquiriendo sobre la influencia del tercer tipo de fotorreceptor en las emociones y los ritmos circadianos está apuntando ya a formas de minimizar los efectos negativos del *jet lag*, el trabajo nocturno y las largas noches de invierno.

FOTOSENSIBLES, PERO OBVIADAS

Los biólogos ya sabían de la existencia de animales dotados de órganos fotodetectores que no intervienen en la formación de imágenes. Los cambios de iluminación pueden informar a un animal de que ha quedado al descubierto y es vulnerable a los depredadores o a la radiación ultravioleta. Numerosos animales han adquirido adaptaciones, como el mimetismo o la fotofobia, para minimizar las consecuencias de una mayor exposición. Esas adaptaciones requieren algún sistema de fotodetección, pero no necesariamente de visión. En 1911, el zoólogo Karl von Frisch, más tarde laureado con un Nobel, observó que las carpas europeas cegadas adoptaban un color oscuro cuando se exponían a la luz. Pero la respuesta desaparecía al lesionarles la base del cerebro, lo que llevó a von Frisch a proponer la existencia de fotorreceptores no visuales en el cerebro profundo.

Numerosas especies animales poseen células que reaccionan ante la luz. Los gorriones sintonizan su reloj circadiano incluso privados de los ojos, como descubrió a principios de los setenta Michael Menaker, por entonces en la Universidad de Texas en Austin. En experimentos sucesivos se demostró que las aves presentan células fotosensibles en el cerebro. Se ha comprobado que una cantidad sorprendente de luz atraviesa el plumaje, la piel y el hueso craneano del ave, y activa esas células.

La posibilidad de que ciertos mamíferos contaran con receptores de luz no implicados en la visión empezó a atraer la atención de los biólogos cuando Keeler, en los años veinte, dio a conocer sus ratones criados en casa. Como la retina de los mamíferos ya se había estudiado en profundidad, se presumió que ese nuevo fotorreceptor se hallaría en algún otro sitio, pero no en los ojos. Pero los estudios realizados con roedores sin ojos a principios de los ochenta por Randy J. Nelson e Irving Zucker, ambos de la Universidad de California en Berkeley, parecían cuestionar esa hipótesis. Los animales no podían ajustar sus ritmos circadianos al ciclo de día y noche, lo que hacía pensar que los fotorreceptores habían de residir dentro del ojo.

Menaker, que entretanto se había trasladado a la Universidad de Oregón, se dispuso a investigar si los ojos de los ratones intervenían en las respuestas a la luz no asociadas a la formación de imágenes. Él y dos de sus doctorandos, Joseph Takahashi y David Hudson, examinaron ratones mutantes sin conos ni bastones funcionales, aunque mantenían unos pocos conos mínimamente activos. Para sorpresa de los investigadores, los ratones ciegos limitaban su actividad al período nocturno, mientras que durante el día se mostraban bastante pasivos, igual que hacen los ratones con visión plena.

Una posible explicación de esa conducta era que los escasos y débiles conos que los ratones aún conservaban respondían a la luz mediante un mecanismo no visual. Pero en 1999, un equipo dirigido por Russell Foster, por entonces en el Colegio Imperial de Londres, se valió de ratones mutantes que carecían por completo de bastones y conos para demostrar que esas células no resultaban necesarias en tal tipo de respuestas. Ante ese hallazgo, solo cabía una explicación: el ojo ha de contener un tipo de fotorreceptor no descubierto todavía.

Era una tesis herética. Las células retinianas que intervienen en la formación de imágenes se conocían desde mediados del siglo XIX. La idea de que durante 150 años se hubiera pasado por alto algún otro tipo de célula fotosensible en la retina parecía absurda.

EN SÍNTESIS

Ciertos animales perciben la luz con órganos extraoculares; los humanos no. Aun así, algunas personas ciegas logran ajustar su organismo al ciclo de día y noche.

En años recientes, tales respuestas no visuales a la luz se han asociado a neuronas especializadas ubicadas en la retina. Además de detectar luz por sí mismas, retransmiten las señales de otras células fotosensibles, como los bastones y conos.

Esas neuronas responden a la luz azul y pudieran ser vestigios de órganos arcaicos heredados de nuestro pasado como invertebrados.

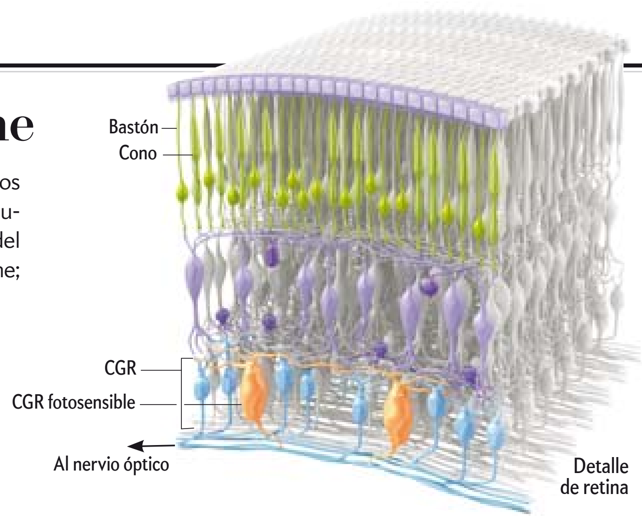
El descubrimiento puede dar lugar a nuevas vías de tratamiento del trastorno afectivo estacional, ciertas alteraciones del sueño y otros males.

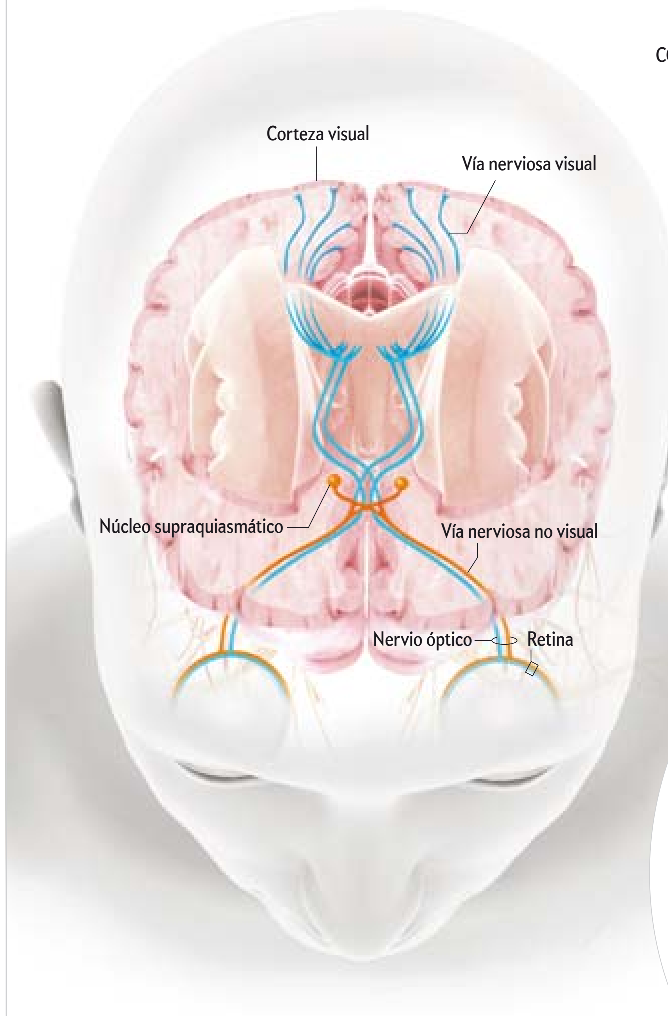


Ignacio Provencio es profesor de biología en la Universidad de Virginia, en la que se doctoró. Su interés por la neurociencia surgió del estudio de luciérnagas, cucarachas y crustáceos marinos, cuando era alumno de Jon Copeland en el Colegio Swarthmore.

Distinguir el día de la noche

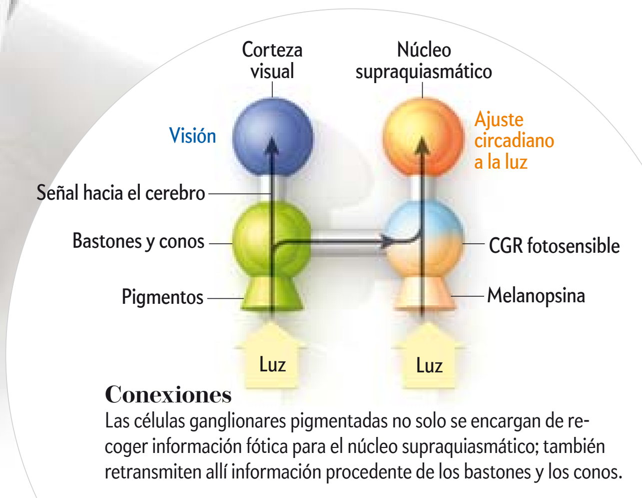
Nuestros ritmos biológicos se ajustan de forma natural a los ciclos de día y noche, respuesta espontánea que subsiste incluso en algunos individuos ciegos. Hasta hace poco, se ignoraba la parte del cuerpo que le indicaba al cerebro la diferencia entre el día y la noche; ahora ya se conoce.





Una nueva función

La visión se produce cuando los bastones y conos de la retina detectan luz y envían señales a la corteza visual, que se halla en el lóbulo occipital del cerebro. Los conos y bastones transfieren las señales al cerebro por medio de las células ganglionares retinianas (CGR), un tipo de neuronas cuyos axones se prolongan por el nervio óptico (*azul, a la izquierda y arriba*). Mediante experimentos se ha demostrado que parte de esas células ganglionares, las CGR fotosensibles (*naranja, arriba*) producen un pigmento antes desconocido, la melanopsina, que las capacita para detectar luz. Las CGR fotosensibles envían información al núcleo supraquiasmático (*izquierda*), centro principal de regulación circadiana, y a otros lugares (*no mostrados*). Es como si nuestros ojos constaran de dos órganos: uno para la visión y otro para respuestas no visuales a la luz.



Conexiones

Las células ganglionares pigmentadas no solo se encargan de recoger información fótica para el núcleo supraquiasmático; también retransmiten allí información procedente de los bastones y los conos.

BRYAN CHRISTIE

DEFENSA DE LA HEREJÍA

Las investigaciones que Mark D. Rollag y el autor emprendieron hace unos quince años en la Universidad de Servicios Uniformados de las Ciencias de la Salud contribuyeron a demostrar que Foster se hallaba en lo cierto. Rollag estaba interesado en una forma distinta de fotorrecepción no visual: el mimetismo en los anfibios. Los renacuajos poseen en la cola células pigmentadas que se oscurecen a la luz, una respuesta adaptativa que les ayuda a camuflarse. Estas células, los melanóforos dérmicos, mantienen la respuesta tras ser extirpadas del animal y cultivadas in vitro. Rollag y el autor identificaron en las células una sustancia cuya composición se asemejaba extraordinariamente a la de las opsinas, una clase de proteínas que facultan a los bastones y los conos para la detección de luz. La nueva proteína fue denominada melanopsina.

Su afinidad con las opsinas indicaba claramente que la melanopsina era la molécula responsable de la respuesta de oscurecimiento. Surgió la pregunta de si la melanopsina desempeñaría también alguna función en otras células que detectaban la luz, por lo que se buscó en otros tejidos de rana que se sabía que eran fotosensibles, como ciertas regiones del cerebro y el iris y la retina del ojo. Resultó que ni los bastones ni los conos contenían la nueva proteína. Pero, de modo sorprendente, sí apareció en las células ganglionares retinianas, unas neuronas de la retina de las que se desconocía su sensibilidad a la luz.

La retina de los vertebrados se halla estructurada en tres estratos. La capa más profunda contiene los bastones y los conos. La luz ha de atravesar otras dos capas antes de ser captada para la visión. La información de los conos y bastones se transfiere a continuación a la capa media, donde es procesada por distin-

tos tipos de células. Por último, estas células comunican la señal procesada a la capa superficial, compuesta principalmente por células ganglionares. De estas parten largos axones encargados de portar la información a través del nervio óptico hasta el cerebro.

En 2000, el grupo de Provencio descubrió que una pequeña parte de las células ganglionares exhibía fotosensibilidad. Después halló que el dos por ciento de las células ganglionares retinianas del ratón contenían melanopsina, así como un pequeño porcentaje de tales células en los humanos. Experimentos realizados en 2002 por el equipo de David M. Berson en la Universidad de Brown confirmaron esos resultados: tras incapacitar los bastones y los conos, aplicaron tinción de contraste a las células ganglionares que contenían melanopsina. A continuación, extrajeron las retinas de los ojos de los ratones y demostraron que las neuronas teñidas se excitaban al ser expuestas a la luz. Dado que los conos y los bastones habían sido incapacitados, tal respuesta entrañaba que, además de retransmitir señales de los bastones y los conos, esas células ganglionares podían detectar luz por sí solas.

La hipótesis fue corroborada en 2002 por otros equipos. El grupo de Samer Hattar, de la Universidad Johns Hopkins, demostró que algunos axones de la retina del ratón estaban conectados con el núcleo supraquiasmático (el área cerebral que regula el reloj interno del organismo), mientras que otros lo estaban con el área del cerebro que controla la contracción de las pupilas. Y las células ganglionares comunicadas con esas regiones se correspondían precisamente con aquellas que contenían melanopsina. Todos los datos apuntaban a una solución del enigma: las neuronas ganglionares fotosensibles permitirían que los ratones con bastones y conos no funcionales contrajeran las pupilas y mantuvieran la sincronía con el ciclo de luz y oscuridad. En cambio, los ratones sin ojos, que carecían de retinas, perderían tales facultades.

Faltaba una prueba más para confirmar la hipótesis. Provencio y otros plantearon que si se criaban ratones sin el gen de la

DATOS EXPERIMENTALES

La doble función de los ojos

Para comprender cómo ajustan los mamíferos sus ritmos circadianos al ciclo de día y noche e identificar el elemento responsable de tal efecto, durante decenios se han realizado experimentos en que se inutilizaban diferentes partes del ojo. Pronto se descubrió que los conos y bastones no resultaban indispensables en el ajuste, pero sí debía intervenir alguna parte del ojo (*segunda y tercera columna*). Cuando se halló melanopsina en un subconjunto de las células ganglionares de la retina y se demostró su sensibilidad a la luz, se dio por seguro que ese pigmento sería la clave, pero entonces se comprobó que tampoco era imprescindible (*cuarta columna*). Nuevos ensayos (*últimas columnas*) pusieron de manifiesto que ese subconjunto de células ganglionares era necesario, aunque el sistema resultaba redundante. Si las neuronas ganglionares carecen de la melanopsina que normalmente presentan, los ritmos circadianos se mantendrán siempre y cuando los bastones y los conos sigan funcionando. Por otra parte, si los bastones y los conos dejan de funcionar, la melanopsina de las células ganglionares todavía suministra las señales necesarias.

Conos y bastones

CGR

CGR fotosensible (produce melanopsina)

Experimento	Retina normal	Bastones y conos no funcionales (por ingeniería genética, o por mutación en humanos)	Sin ojos (extirpados en ratones)	Sin melanopsina (ratones transgénicos)	Sin bastones ni conos ni melanopsina (ratones transgénicos)	Sin células productoras de melanopsina (destruidas de modo selectivo en ratones)
¿Existe visión?	✓	✗	✗	✓	✗	✓
¿Existe adaptación circadiana a la luz?	✓	✓	✗	Parcial	✗	✗
Células responsables y consecuencias	Funciones normales	La adaptación a la luz no requiere bastones ni conos	Los ojos son necesarios para la adaptación	La melanopsina interviene, pero no es necesaria	Es necesario que haya bastones y conos, o bien melanopsina	Las células productoras de melanopsina son necesarias

BRYAN CHRISTIE

melanopsina, los animales no producirían el pigmento y, por tanto, no presentarían respuestas de carácter no visual a la luz. El desconcierto fue absoluto cuando observaron que los ratones sin melanopsina ponían en hora sus relojes circadianos sin ninguna dificultad.

UN ÚLTIMO OBSTÁCULO

Para explicar esa contradicción, se consideró la posibilidad de que otro fotorreceptor no visual se hallase agazapado en la retina. Pero ello parecía improbable por diversas razones. La más importante, que el genoma completo del ratón, secuenciado en el tiempo en que Provencio concluía los estudios de ratones con genes inactivados, no contenía otros genes obvios de fotopigmentos.

La segunda hipótesis consistía en que tal vez los bastones, los conos y las células ganglionares fotosensibles actuasen juntos para controlar las respuestas no visuales a la luz. Para comprobarlo, se obtuvieron ratones transgénicos que carecían de bastones, conos y melanopsina. Los animales no mostraban ningún tipo de respuesta a la luz, ni visual ni no visual, y se comportaban como si se les hubieran extirpado los ojos. Concluimos por fin que los bastones, los conos y las células ganglionares melanopsínicas colaboraban para aportar al cerebro información lumínica no visual.

De hecho, están apareciendo indicios de que las células ganglionares fotosensibles funcionan también como un conducto de transmisión de información lumínica no visual desde los conos y bastones hasta el cerebro, de igual modo que otras células ganglionares retinianas transfieren señales visuales a las áreas del cerebro responsables de la visión. En 2008, tres grupos, entre ellos el del autor, idearon por separado un método para destruir células ganglionares fotosensibles de ratones sin afectar al resto del organismo. Aunque los ratones conservaron la visión, tendían a embarullarse con los días y las noches, y acusaban también dificultades para contraer las pupilas. En otras palabras, las células ganglionares especializadas son necesarias para engendrar respuestas no visuales a la luz, pero el sistema lleva integrada cierta redundancia: esas células pueden detectar luz de forma autónoma, retransmitir información procedente de conos y bastones, o ambas cosas.

El enigma había quedado por fin resuelto; al menos, en el caso de los ratones. Pero se han hallado indicios de que en los humanos existiría el mismo dispositivo fisiológico. El grupo de Foster publicó en 2007 un estudio sobre dos pacientes ciegos que carecían de conos y bastones funcionales —el equivalente humano de los ratones de Keeler—, pero que todavía podían ajustar sus ritmos circadianos cuando se les exponía periódicamente a luz azul. Las longitudes de onda de luz azul que desencadenaban una respuesta óptima se hallaban precisamente dentro del intervalo de longitudes que la melanopsina detecta. Los grupos de Provencio y Berson obtuvieron tal resultado en estudios en que se forzó a estirpes de neuronas sin fotosensibilidad para que produjeran melanopsina. Las células respondieron excitándose a la luz azul.

Se realizó otro descubrimiento, tal vez más interesante aún: cuando la luz incidía en la melanopsina, se iniciaba en el interior de las células una cadena de señales químicas más próxima a la que sucede en los fotorreceptores de moscas y calamares que a la que se produce en los conos y bastones de los mamíferos. El hallazgo no resultó del todo inesperado, porque años atrás se había identificado que la secuencia de genes de la melanopsina se asemejaba más a las secuencias de genes de fotopigmentos de invertebrados que a las de vertebrados. Así pues, en los mamíferos, la melanopsina representaría el fotopigmento de un sistema fotorreceptor no visual, primitivo e ignorado hasta ahora, que se alojaría en el seno de la retina, junto al sistema visual, más avanzado.

Amén de su interés científico, el descubrimiento de este «órgano», oculto y nuevo, pudiera tener consecuencias clínicas, porque apunta hacia un vínculo, no considerado hasta ahora, entre la salud ocular y la salud mental. Se deduce de ciertos estudios que la exposición a la luz azul contribuye a mantenernos alerta, lo que permitiría atenuar los efectos del desfase horario provocado por los viajes rápidos, la privación de sueño y el síndrome afectivo estacional, un trastorno frecuente en latitudes elevadas que puede desembocar en una depresión debilitante e incluso llevar al suicidio. Probablemente, la terapia fótica alivia esas alteraciones porque actúa sobre las células ganglionares fotosensibles. Otros estudios han demostrado que los niños ciegos con glaucoma, enfermedad que afecta a las células ganglionares de la retina, parecen más propensos a trastornos del sueño que los niños invidentes por otras razones. Es posible que con las miras puestas en la salud de las células ganglionares fotosensibles se llegue a una nueva clase de tratamientos para un amplio abanico de trastornos.

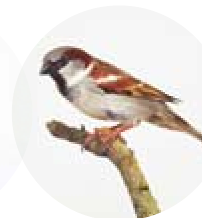
GALERÍA

No ver la luz, sino sentirla

Casi todos los organismos fijan sus ritmos biológicos según detectan la luz del día y la noche. Algunos animales cuentan con órganos fotosensibles especializados, sin parte en la visión, que a veces intervienen en otras respuestas de carácter no visual, como el camuflaje. Aunque en el hombre y otros mamíferos los receptores no visuales se albergan en los ojos, en muchos animales no.



Los renacuajos y otros anfibios captan la luz mediante células pigmentadas de la epidermis, lo que les ayuda a pasar desapercibidos en distintos ambientes.



Los gorriones adaptan sus ritmos circadianos incluso si se les priva de ojos. Ciertas células especializadas del cerebro les permiten percibir la luz a través de las plumas, la piel y el hueso.



Los primeros mamíferos en los que se descubrió una adaptación a los ritmos circadianos fueron ratones ciegos. También conservan respuestas como la constricción y dilatación de las pupilas.

KIM TAYLOR Y JANE BURTON, GETTY IMAGES (*renacuajo*); CYRIL LAUBSCHER, GETTY IMAGES (*gorrión*); GETTY IMAGES (*ratón*)

PARA SABER MÁS

Melanopsin: an opsin in melanophores, brain, and eye. Ignacio Provencio, Guisen Jiang, Willem J. de Grip, William Pär Hayes y Mark D. Rollag en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n.º 1, págs. 340-345, 6 de enero de 1998.

Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. David M. Berson, Felice A. Dunn y Motoharu Takao en *Science*, vol. 295, págs. 1070-1073, 8 de febrero de 2002.

Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. Michael Tri Hoang Do y King-Wai Yau en *Physiological Reviews*, vol. 90, n.º 4, págs. 1547-1581, octubre de 2010.

Guía para el estudio de la retina: **webvision.med.utah.edu**



John C. Baez es físico matemático y trabaja en el Centro de Tecnologías Cuánticas de Singapur. Con anterioridad ha investigado en física fundamental.



John Huerta acaba de obtener su doctorado en matemáticas por la Universidad de California en Riverside. Su investigación se centra en los fundamentos de la supersimetría.

MATEMÁTICAS

OCTONIONES Y TEORÍA DE CUERDAS

Un sistema numérico concebido en el siglo XIX podría explicar por qué la teoría de cuerdas exige un espaciotiempo de diez dimensiones

John C. Baez y John Huerta

DE NIÑOS, TODOS NOS FAMILIARIZAmos con los números. Empezamos por aprender a contar y continuamos con las sumas, las restas, las multiplicaciones y las divisiones. Pero el sistema numérico que estudiamos en la escuela no es sino uno de entre muchos posibles. Otras clases de números se emplean con frecuencia en física o geometría. Una de las alternativas más extrañas la constituyen los octoniones. Ignorados en gran medida desde su descubrimiento, en 1843, a lo largo de las últimas décadas han cobrado una importancia curiosa en teoría de cuerdas. Si dicha teoría describe de manera correcta la naturaleza, quizá los octoniones escondan la explicación de por qué el universo tiene el número de dimensiones espaciotemporales que tiene.

ZACHARY ZAVISLAK

LO IMAGINARIO HECHO REAL

Los octoniones no constituirían el primer ejemplo de un constructo de la matemática pura que nos ayuda a mejorar nuestro entendimiento del cosmos. Tampoco serían el primer sistema numérico alternativo al que, tiempo después de ser concebido, se le encuentra un uso práctico. Para entender por qué, comencemos por el caso más sencillo: la clase de números que aprendemos en la escuela, a los que los matemáticos denominan números reales. El conjunto de los números reales puede representarse sobre una recta; por ello, decimos que se trata de un conjunto unidimensional. También podemos dar la vuelta al argumento: la recta es unidimensional porque, para localizar un punto en ella, basta con especificar un solo número real.

Los números reales monopolizaron la matemática hasta el siglo XVI. Pero los eruditos del Renacimiento comenzaron a considerar ecuaciones cada vez más intrincadas, para cuya resolución los números reales no parecían bastar. Fue entonces cuando el matemático, físico, astrólogo y apostador italiano Gerolamo Cardano introdujo, a modo de «arma secreta», la raíz cuadrada de –1: se decidió a emplear ese número misterioso como paso intermedio en cálculos cuyos resultados eran simples números reales. Cardano no sabía muy bien por qué aquel ardid funcionaba, pero el caso era que le permitía obtener las respuestas correctas. Sus estudios, publicados en 1545, marcaron el comienzo de una larga controversia: ¿existía realmente la raíz cuadrada de –1, o se trataba de un simple truco? Cien años después, nada menos que René Descartes emitió su veredicto cuando, de manera peyorativa, otorgó a dicho número el calificativo de «imaginario». A día de hoy, lo denotamos mediante la letra i.

A pesar de todo, los matemáticos siguieron los pasos de Cardano y comenzaron a trabajar con números complejos: aquellos de la forma $a + bi$, donde a y b simbolizan números reales. Alrededor de 1806, Jean-Robert Argand popularizó la idea de que los números complejos podían interpretarse como los puntos de un plano. ¿Cómo? Muy simple: el valor de a nos indica cuán a la derecha o a la izquierda se sitúa el punto, mientras que el número b nos informa sobre su altura. En otras palabras, podemos pensar en los números complejos como en un conjunto de dos dimensiones. Además, Argand mostró que las operaciones entre números complejos podían entenderse como manipulaciones geométricas del plano.

Para entender la interpretación geométrica de las operaciones matemáticas, consideremos primero el caso de los números reales. ¿Cómo se mueven los puntos de la recta real cuando sobre ellos se efectúa una manipulación aritmética? Al sumar o restar, los puntos se desplazan hacia la derecha o hacia la izquierda. Por otro lado, al multiplicar o dividir por un número positivo, la recta se dilata o se contrae: si multiplicamos por 2 los puntos se alejan entre sí en dicha proporción; si dividimos por esa cantidad, la distancia entre los puntos se reduce a la mitad. Multiplicar por –1 invierte la orientación de la recta.

Del mismo modo, las operaciones con números complejos pueden interpretarse como transformaciones geométricas del plano. Dado un punto del plano, sumarle $a + bi$ equivale a desplazarlo a unidades en la dirección horizontal y b en la vertical. Multiplicarlo por otro número complejo alarga o acorta su distancia al origen, al tiempo que induce una rotación en torno al origen de coordenadas. En particular, multiplicar un número por i genera una rotación de 90 grados en sentido antihorario. Así, al multiplicar 1 por i dos veces, lo rotamos 180 grados y lo desplazamos hasta la posición del número –1. La división es la operación inversa a la multiplicación, por lo que las expansiones se convierten en contracciones —o viceversa— y las rotaciones tienen lugar en sentido contrario.

Hemos visto que resulta posible generalizar las operaciones matemáticas de los números reales a los números complejos. Además, y como ya sabía Cardano, estos nos permiten resolver más ecuaciones que los números reales. Dado que un sistema numérico de dos dimensiones nos otorga un poder de cálculo adicional, cabe preguntarse acerca de la posibilidad de definir números de tres, cuatro o más dimensiones. Por desgracia, una extensión sencilla se antoja imposible.

HAMILTON, EL ALQUIMISTA

En 1835, a la edad de 30 años, el físico y matemático William Rowan Hamilton se percató de que podía manipular los números complejos como parejas de números reales. Por aquel entonces, los números complejos acostumbraban a escribirse como $a + bi$, la forma popularizada por Argand. Hamilton se dio cuenta de que $a + bi$ podía entenderse como una manera peculiar de expresar un par de números reales: (a, b). Bajo esta forma, las operaciones de suma y resta tomaban una apariencia muy sencilla, pues bastaba con sumar o restar cada una de las componentes de cada par. Hamilton halló también una serie de reglas, algo más enrevesadas, para escribir en esta notación el resultado de un producto, de tal manera que se preservase la bella interpretación geométrica de Argand.

Tras dar con esa formulación algebraica, Hamilton intentó durante años generalizar la idea y definir un álgebra para ternas de números: en justa analogía, esta habría de admitir una interpretación geométrica en tres dimensiones. Sin embargo, su esfuerzo solo se vio recompensado por incontables frustraciones. En una ocasión escribió a su hijo: «Cada mañana [...] cuando bajaba a desayunar, tu hermano William Edwin y tú solíais preguntarme: “Bien, papá, ¿ya sabes multiplicar ternas de números?”, a lo que yo siempre me veía obligado a replicar, con un triste movimiento de cabeza: “No, solo sé sumarlos y restarlos”». Aunque entonces Hamilton no podía saberlo, se había encomendado una tarea imposible.

Hamilton buscaba un sistema numérico tridimensional cuyos elementos se pudieran sumar, restar, multiplicar y dividir. En esta última operación residen todas las dificultades. Un sistema numérico divisible recibe el nombre de *álgebra de división*. Para

EN SÍNTESIS

Todos estamos familiarizados con los números reales, pero existen otros sistemas numéricos. Entre ellos, los más conocidos son los números complejos, los cuales pueden considerarse números de dos dimensiones.

Es posible construir sistemas numéricos de varias dimensionalidades, pero solo aquellos de una, dos, cuatro y ocho dimensiones permiten definir las operaciones de suma, resta, multiplicación y división.

Uno de esos casos son los octoniones, un sistema numérico de dimensión ocho. Concebidos en la década de 1840, la falta de aplicaciones prácticas hizo que gran parte de los matemáticos los ignorase durante 150 años.

Sin embargo, los octoniones podrían ayudarnos a entender algunas propiedades de las teorías físicas modernas, como la supersimetría, la teoría de cuerdas y su relación con el número de dimensiones del espaciotiempo.

comprender el fracaso de Hamilton hubo que esperar hasta 1958, cuando se demostró un resultado que, por más que los matemáticos habían venido intuyendo desde hacía décadas, no dejaba de resultar sorprendente: toda álgebra de división debe ser de dimensión uno (el álgebra que corresponde a los números reales), dos (la de los números complejos), cuatro u ocho. No existen más posibilidades. Eso explica por qué, para lograr su objetivo, Hamilton hubo de cambiar las reglas del juego.

Hamilton halló la solución el 16 de octubre de 1843, cuando paseaba junto a su esposa por el Canal Real de Dublín, camino de una reunión de la Real Academia Irlandesa. Para describir las rotaciones, expansiones y contracciones en tres dimensiones no bastaban tres números: necesitaba uno más. Hamilton se dio cuenta de que el sistema numérico que buscaba debía tener, por tanto, cuatro dimensiones. Así nacieron los cuaterniones: números de la forma $a + bi + cj + dk$, donde i, j y k simbolizan tres raíces cuadradas de –1 que satisfacen ciertas relaciones entre sí.

Más tarde, Hamilton escribiría: «Justo allí y en ese momento sentí que el circuito galvánico del pensamiento se cerraba, y las chispas que de él emanaban eran las ecuaciones fundamentales entre i, j y k, exactamente tal y como las he venido usando desde entonces». Y, en un acto de vandalismo matemático digno de mención, grabó esas ecuaciones en el puente de Brougham. Aunque a día de hoy se encuentran enterradas bajo grafitis, una placa conmemora el acontecimiento.

Quizá parezca extraño que necesitemos un espacio de cuatro dimensiones para describir los movimientos en el espacio tridimensional, pero no resulta muy complicado de entender. Se requieren tres números para describir las rotaciones, como comprobaremos si nos imaginamos por un momento pilotando un avión: habremos de controlar el cabeceo (la inclinación del morro hacia arriba o hacia abajo), la guiñada (el ángulo que toma el eje de la nave hacia la derecha o la izquierda) y el alabeo (la inclinación del plano que forman las alas con respecto a la horizontal). El cuarto número es el que se requiere para dar cuenta de la expansión o la contracción.

Hamilton pasó el resto de sus días obsesionado con los cuaterniones, a los cuales encontró numerosas aplicaciones prácticas. A día de hoy, la mayoría de los casos se resuelven mediante el empleo de vectores, objetos que pueden entenderse como cuaterniones simplificados de la for-

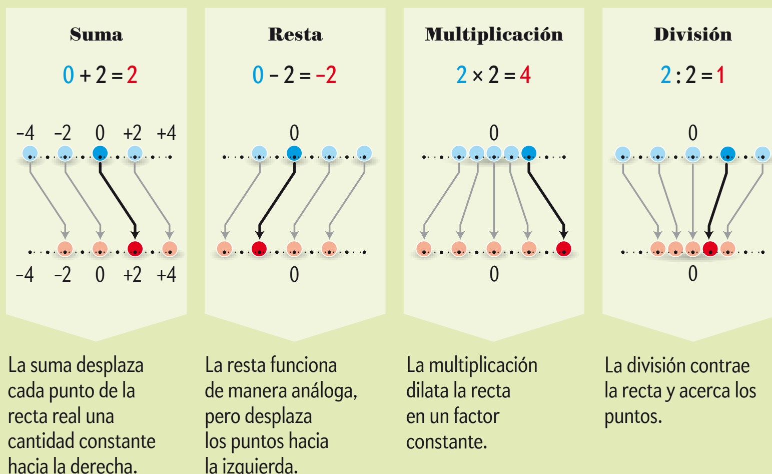
BROWN BIRD DESIGN

MÁS ALLÁ DE LA RECTA REAL

Aritmética en una y dos dimensiones

Los números reales pueden representarse como los puntos de una recta, con lo que las operaciones algebraicas básicas (suma, resta, multiplicación y división) adquieren un significado geométrico. Esa conexión entre álgebra y geometría puede generalizarse a otros sistemas de números. Aquí mostramos la interpretación geométrica de las operaciones básicas con números complejos, los cuales pueden interpretarse como los puntos de un plano.

Números reales



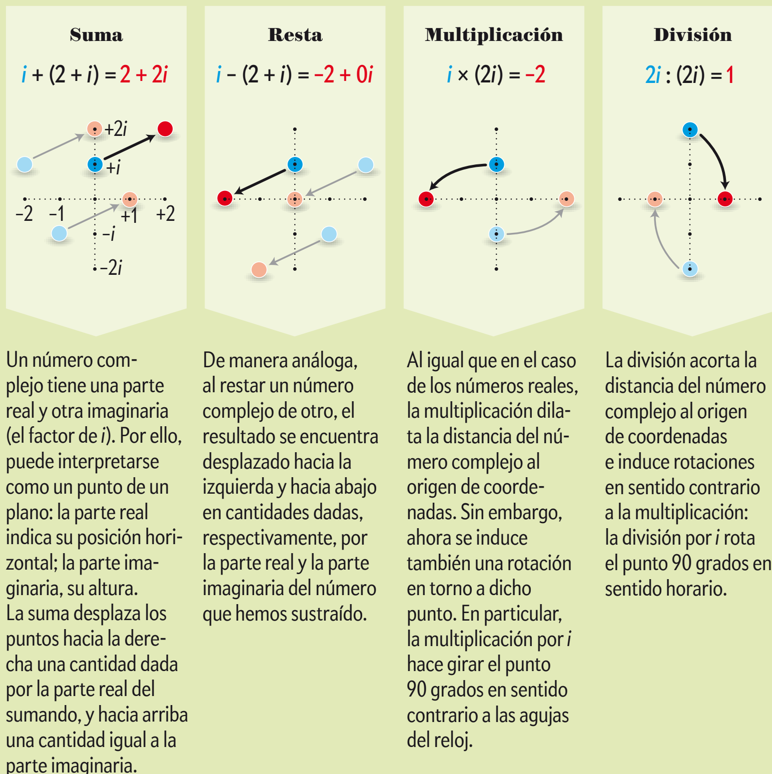
La suma desplaza cada punto de la recta real una cantidad constante hacia la derecha.

La resta funciona de manera análoga, pero desplaza los puntos hacia la izquierda.

La multiplicación dilata la recta en un factor constante.

La división contrae la recta y acerca los puntos.

Números complejos



Un número complejo tiene una parte real y otra imaginaria (el factor de i). Por ello, puede interpretarse como un punto de un plano: la parte real indica su posición horizontal; la parte imaginaria, su altura. La suma desplaza los puntos hacia la derecha una cantidad dada por la parte real del sumando, y hacia arriba una cantidad igual a la parte imaginaria.

De manera análoga, al restar un número complejo de otro, el resultado se encuentra desplazado hacia la izquierda y hacia abajo en cantidades dadas, respectivamente, por la parte real y la parte imaginaria del número que hemos sustraído.

Al igual que en el caso de los números reales, la multiplicación dilata la distancia del número complejo al origen de coordenadas. Sin embargo, ahora se induce también una rotación en torno a dicho punto. En particular, la multiplicación por i hace girar el punto 90 grados en sentido contrario a las agujas del reloj.

La división acorta la distancia del número complejo al origen de coordenadas e induce rotaciones en sentido contrario a la multiplicación: la división por i rota el punto 90 grados en sentido horario.

ma $ai + bj + ck$ (aquellos cuya primera componente es nula). No obstante, los cuaterniones siguen desempeñando un papel importante, ya que proporcionan un método muy eficiente para generar rotaciones tridimensionales en un ordenador. Por ello, se emplean desde en los sistemas de control de la orientación de naves espaciales hasta en los gráficos para videojuegos.

Llegados a este punto, el lector se preguntará qué son exactamente j y k, máxime cuando ya habíamos definido i como la raíz cuadrada de –1. ¿Existen en verdad esas otras raíces de –1? Y, de ser así, ¿por qué no seguir inventando más? Tales preguntas le fueron planteadas a Hamilton por un compañero de universidad, el jurista John Graves, cuya afición por el álgebra fue lo que despertó el interés inicial de Hamilton por los números complejos y sus generalizaciones. Justo un día después de aquel fructífero paseo otoñal de 1843, Hamilton escribió a Graves para referirle su hallazgo. Graves contestó nueve días después. Alababa la audacia de Hamilton, pero añadía: «Con todo, hay algo en el sistema que me perturba. No tengo claro hasta qué punto somos libres de crear números de forma arbitraria y dotarlos de propiedades sobrenaturales». Y preguntaba: «Si tu alquimia te permite crear tres libras de oro, ¿por qué detenerte ahí?».

MÁS IMAGINARIOS

Pero, al igual que hiciera Cardano con anterioridad, Graves dejó a un lado sus reticencias durante un tiempo. Ello le bastó para materializar su propio oro: el 26 de diciembre escribía de nuevo a Hamilton para comunicarle que había concebido una clase de números de ocho dimensiones, a los que bautizó como «octavas» y que hoy conocemos bajo el nombre de octoniones. Sin embargo, Graves jamás logró que Hamilton se interesase por sus ideas. Este prometió presentar las octavas de Graves ante la Real Sociedad Irlandesa, lo que en aquella época equivalía a publicar un resultado matemático. Pero Hamilton pospuso el asunto una y otra vez, hasta que, en 1845, un joven Arthur Cayley redescubrió los octoniones y se adelantó a Graves en su publicación. Por ello, los octoniones se denominan también números de Cayley.

¿Por qué los octoniones jamás fueron del agrado de Hamilton? Por un lado, porque se hallaba obsesionado con su propio descubrimiento, los cuaterniones. Por otro, contaba con una razón puramente matemática: los octoniones violaban una de las leyes más básicas de la aritmética tradicional.

Los cuaterniones ya exhiben una propiedad bastante peculiar. Cuando multiplicamos números reales, el orden de los factores no afecta al resultado: 2×3 es igual que 3×2. Decimos por ello que la multiplicación es conmutativa. Lo mismo se aplica a los números complejos. Los cuaterniones, sin embargo, no conmutan. Ello se debe a que describen rotaciones en tres dimensiones y, cuando rotamos un objeto, el orden en que lo hagamos sí da lugar a resultados diferentes. Tome un libro con la cubierta mirando hacia usted y gírelo 180 grados en torno al eje horizontal. Verá la contraportada. Después, rótelo 45 grados alrededor del eje vertical y en el sentido de las agujas del reloj (según se vería desde arriba). Podrá ver las hojas. Ahora, parta otra vez de la posición inicial y efectúe las mismas rotaciones, pero en orden inverso. En esta ocasión, lo que verá es el lomo del libro.

Los octoniones resultan aún más extraños. No solo no conmutan, sino que tampoco satisfacen la propiedad asociativa: aquella según la cual $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$. Todos conocemos una operación que no es asociativa: la resta: $(3 - 2) - 1$ difiere de $3 - (2 - 1)$. Sin embargo, la mayoría de los matemáticos, por más que se hayan habituado a los productos no conmutativos, acostumbran a pensar en la multiplicación como en una operación asociativa. Las rotaciones, por ejemplo, son asociativas aunque no conmuten.

Pero puede que la razón principal para ese rechazo residiese en que, en su época, nadie halló en los octoniones ninguna utilidad clara. Se sabía que guardaban relación con la geometría de los espacios de siete y ocho dimensiones; pero, durante más de un siglo, ello no dejó de considerarse como un mero ejercicio intelectual. Habría que esperar al desarrollo de la física de partículas moderna —y de la teoría de cuerdas— para apreciar los posibles usos de este sistema numérico.

SUPERSIMETRÍA Y CUERDAS

Durante los años setenta y ochenta del siglo pasado, los físicos teóricos concibieron una idea de gran belleza: la supersimetría.

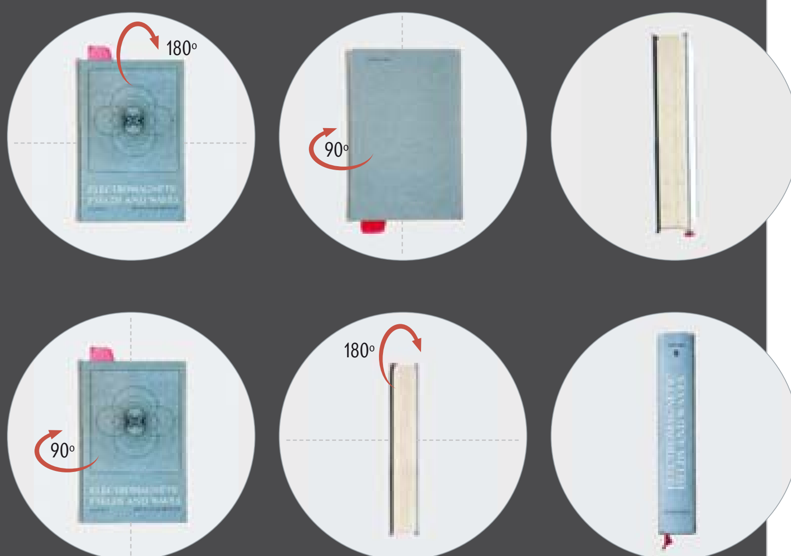
OPERACIONES NO CONMUTATIVAS

El orden en las rotaciones

Los números reales pueden multiplicarse en el orden que deseemos sin que ello afecte al resultado: por ejemplo, 2×3 es igual que 3×2. Sin embargo, en sistemas numéricos de más dimensiones, como los cuaterniones o los octoniones, el orden de las operaciones sí modifica el resultado. Consideremos los cuaterniones, los cuales describen rotaciones en tres dimensiones. Si tomamos un libro, el orden en el que se sucedan dos rotaciones determinadas determinará la orientación final: si primero lo invertimos y después lo giramos (*arriba*), acabaremos viendo las páginas del volumen. Pero si comenzamos por girarlo y solo después lo invertimos (*abajo*), la parte que quedará enfrentada a nosotros será el lomo.

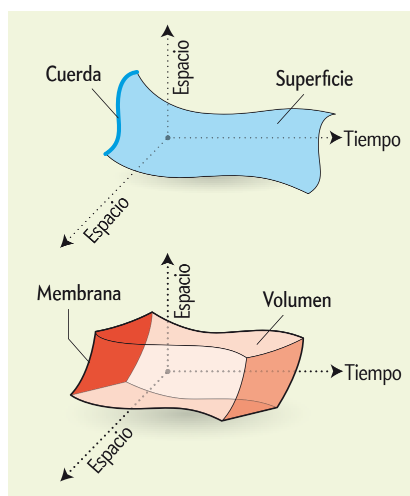
Invertir y rotar

Rotar e invertir



BROWN BIRD DESIGN

(Algo después, llegarían a la conclusión de que la teoría de cuerdas debía incorporar dicho principio.) En esencia, la supersimetría afirma que existe una simetría entre la materia y las fuerzas de la naturaleza: a cada partícula de materia (como el electrón) le correspondería una partícula gemela mediadora de una fuerza (como el fotón, portador de la interacción electromagnética), y viceversa. Imagine contemplar el universo reflejado en un espejo peculiar que, en vez de permutar derecha e izquierda, intercambiase las partículas de materia y aquellas transmisoras de las fuerzas. En un universo supersimétrico, esa extraña imagen especular resultaría indistinguible del original. Aunque aún no se ha hallado ninguna prueba experimental que confirme que la naturaleza es supersimétrica, la teoría exhibe una belleza y propiedades tan seductoras que, a día de hoy, son muchos quienes confían en ella.



Cuerdas y membranas: Al transcurrir el tiempo, una cuerda barre una superficie bidimensional; de manera análoga, las membranas de la teoría M cubren un volumen de tres dimensiones espaciotemporales. Si añadimos las ocho dimensiones características de los octoniones, obtenemos, según el caso, un espaciotiempo de diez u once dimensiones. Ello podría explicar por qué dichas teorías requieren justo ese número de dimensiones espaciotemporales.

Sin embargo, algo que sí tenemos por cierto es la validez de la mecánica cuántica. Según esta, las partículas se comportan también como ondas. En la versión estándar de la mecánica cuántica en tres dimensiones (más el tiempo) que los físicos emplean cada día, cierto tipo de números (espinores) describen el movimiento ondulatorio de las partículas de materia, y números de otro tipo (vectores) dan cuenta de la dinámica de las partículas mediadoras. A fin de entender las interacciones entre unas y otras, hemos de combinar ambas clases de números mediante un sucedáneo improvisado de multiplicación. Aunque el método funciona, no resulta elegante en absoluto.

Ahora, imagine por un momento un universo en el que no existiese el tiempo, sino solo el espacio. En ese caso, si el universo tuviese dimensión uno, dos, cuatro u ocho, tanto las partículas de materia como las mediadoras quedarían descritas por una misma clase de números: los pertenecientes a un álgebra de división normada, el único sistema que permite efectuar sumas, restas, multiplicaciones y divisiones. En esas dimensiones, tanto vectores como espinores se corresponden, respectivamente, con los números reales, los complejos, los cuaterniones y los octoniones. La supersimetría aparece de manera natural, y la materia y las fuerzas de la naturaleza admiten una descripción unificada. En cada caso, la multiplicación da cuenta de las interacciones entre todas las partículas, cuya dinámica, sin importar el tipo, se expresa en un mismo sistema numérico.

Pero nuestro universo de juguete no es real, puesto que carece de tiempo. La sorpresa llega cuando incorporamos la coordenada temporal en la teoría de cuerdas. Una cuerda posee una dimensión espacial, por lo que, a medida que el tiempo transcurre, la cuerda barre una superficie bidimensional en el espaciotiempo. Como resultado, para obtener una teoría de cuerdas supersimétrica necesitamos dos dimensiones más que antes, ya que hemos de añadir una por la cuerda y otra por el tiempo. En teoría de cuerdas, la supersimetría surge en tres, cuatro, seis y diez dimensiones espaciotemporales, ya que en tales casos las vibraciones transversales de la cuerda pueden representarse mediante los números de un álgebra de división.

Pero, además, se da una curiosa coincidencia. Se sabe desde hace tiempo que, al incorporar los efectos de la mecánica cuántica, las teorías de supercuerdas formuladas en tres, cuatro y seis dimensiones sufren de ciertas inconsistencias llamadas anomalías (que, en esencia, implican que calcular una misma cantidad de dos maneras diferentes no garantiza el mismo resultado). La única teoría cuántica consistente es la formulada en diez dimensiones: la misma relacionada con los octoniones. Por tanto, si la teoría de cuerdas se mostrase correcta, los octoniones serían algo más que una simple curiosidad: desempeñarían un papel fundamental a la hora de entender el espaciotiempo, la materia y las fuerzas de la naturaleza.

La historia no acaba aquí. Algunas teorías recientes van más allá de las cuerdas y consideran objetos fundamentales de más dimensiones. Una membrana bidimensional, o «2-brana», se asemeja en cada instante a una hoja de papel. A medida que transcurre el tiempo, barre un volumen tridimensional en el espaciotiempo. Por el mismo argumento empleado en el caso anterior, ahora esperaríamos que la supersimetría emergiera de forma natural en cuatro, cinco, siete y once dimensiones. De hecho, existe una teoría, la «teoría M», que de manera natural requiere once dimensiones espaciotemporales: de nuevo, el número ligado a los octoniones. Por desgracia, nadie comprende lo bastante bien la teoría M como para formular sus ecuaciones fundamentales, por lo que resulta difícil aventurar el aspecto que tomará en el futuro.

Llegados aquí, hemos de enfatizar que, hasta ahora, ni la teoría de cuerdas ni la teoría M han dado lugar a ninguna predicción experimental. Se trata de sueños muy bellos, pero, por el momento, no pasan de ahí. El universo no parece tener ni diez ni once dimensiones, y tampoco se han hallado indicios empíricos de la existencia de supersimetría. David Gross, unos de los principales expertos en teoría de cuerdas, ha estimado en un 50 por ciento las probabilidades de observar alguna prueba de supersimetría en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN. Los escépticos sitúan ese porcentaje muy por debajo.

Así las cosas, queda aún un largo camino por recorrer hasta averiguar si los octoniones desempeñan o no un papel en las leyes físicas fundamentales. Por supuesto, el estudio de la belleza matemática constituye un fin digno en sí mismo. Pero resultaría mucho más hermoso si los octoniones se hallasen grabados en el mismo tejido de la naturaleza.

PARA SABER MÁS

An imaginary tale: The story of the square root of −1. Paul J. Nahin. Princeton University Press, 1998.

The octonions. John C. Baez en *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 39, págs. 145-205, 2002. El artículo e información adicional pueden encontrarse en **math.ucr.edu/home/baez/octonions**

Ubiquitous octonions. Helen Joyce en *Plus Magazine*, vol. 33, enero de 2005. En **plus.maths.org/content/33**

por Sandra Navarro, Irene Teixidor y Joandomènec Ros

Un mundo flotante: los sargazos

Este ecosistema peculiar constituye el sustento de numerosas especies animales de los mares tropicales

Los sargazos, diversas especies de algas pardas del género *Sargassum* (principalmente *S. fluitans* y *S. natans*), son plantas flotantes. Representan un ecosistema muy particular: ocupan grandes extensiones de los océanos tropicales de todo el mundo, en especial en el mar de los Sargazos, en el Atlántico noroccidental tropical, donde las corrientes los acumulan y forman manchas con una superficie que varía desde un metro hasta un kilómetro cuadrado.

Su abundancia, su elevada producción y el hecho de que constituyen almadías naturales en las aguas pobres de los océanos tropicales hacen de los sargazos un sustrato idóneo para muchas especies de abolengo bentónico (propias de los fondos marinos, sobre todo del litoral), aunque en el océano forman parte del neuston, los organismos que viven asociados a la película superficial del agua, en la interfase agua-aire.

Algas, hidrarios, briozoos, cirrípedos y otros invertebrados incrustantes representan algunos de los epibiontes que viven sobre los talos de las algas y sus flotadores. Crustáceos, moluscos, gusanos y peces se alimentan a su vez de los sargazos y de sus epibiontes. Una característica destacable de la mayoría de esas especies es que son crípticas, es decir, comparten la coloración pardusca moteada de los sargazos para camuflarse entre ellos.

La cantidad promedio de estas algas en el mar de los Sargazos se ha estimado en solo un gramo por metro cuadrado. Sin embargo, su producción primaria (de hasta diez gramos de carbono por metro cuadrado y día) es de uno a dos órdenes de magnitud superior a la del fitoplancton, con lo que su contribución a la economía del océano oligotrófico, pobre en nutrientes, resulta importante. La presencia de plásticos, alquitrán y otros contaminantes que también flotan en la superficie amenaza cada vez más a este ecosistema peculiar y, en general, a los organismos neustónicos.

Las frondes de *Sargassum* son un buen sustrato para muchas especies epibiontes; en la fotografía, hidrarios.

FOTOGRAFÍAS DE ENEKO ASPILLAGA





Epibiontes (briozoos) sobre un flotador de *Sargassum*



Cangrejo de los sargazos, *Planes* sp.





Pez de los sargazos, juvenil de *Histrio* sp. Las especies asociadas a los sargazos son crípticas, lo que les permite camuflarse entre las frondes.



por Alfredo Marcos



Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.

Filosofía post-genómica

El desarrollo de la biología tras la secuenciación del genoma humano plantea nuevos retos filosóficos

«*There is a revolution occurring in the biological sciences*». Con esta frase da comienzo un artículo publicado en 2003 por la revista *Genome Research*. Ese mismo año culminó el Proyecto Genoma Humano (PGH). Podríamos hablar, pues, de una «revolución post-genómica». La biología había cubierto en esa fecha un trayecto de cincuenta años que coincide con la segunda mitad del siglo xx. Este tramo histórico principia en los años cincuenta con el descubrimiento de la estructura y función del ADN.

Entonces comenzó a cundir la idea de que habíamos dado con las claves últimas de la vida. Se abría ante nosotros una perspectiva de conocimiento y de dominio hasta entonces impensada. La orientación de la investigación biomédica cambió drásticamente. Los fondos y los recursos humanos se dirigieron con preferencia hacia el ámbito en plena ebullición de la bioquímica, la biología molecular y la genética molecular, muchas veces en detrimento de otros campos más clásicos de las ciencias de la vida.

También el sesgo filosófico cambió. La nueva biología trajo de la mano una clara inclinación hacia el reduccionismo. En 1972 este sesgo era ya patente y, para algunos, preocupante. Dos de los creadores de la teoría sintética de la evolución, Theodosius Dobzhansky y Francisco J. Ayala, entonces ambos en la Universidad de California en Davis, convocaron ese año un congreso, que tuvo lugar en Italia, para hablar sobre los «problemas de la reducción en biología». A él asistieron biólogos y filósofos, figuras de primera línea como Peter Medawar, nóbel de medicina en 1960, y Karl Popper, entonces profesor emérito de la Escuela de Economía y Ciencias Políticas de Londres. Ayala distinguió tres tipos de reduccionismo: metodológico, epistemológico y ontológico. El avance de las posiciones reduccionistas se estaba produciendo desde lo metodológico hacia lo ontológico. Es decir, comenzamos dando la bienvenida a métodos moleculares que produjeron importantes descubrimientos, pero acabamos aceptando que todo el ámbito de lo vivo se reduce de hecho a moléculas.

La imagen era simple y atractiva: los organismos vivos son producto del genoma, que está formado por una ristra de genes, o sea, fragmentos de ADN, cada uno de los cuales sirve para sintetizar una proteína. Toda la dinámica de la vida quedaba reducida a su base genético-molecular. A partir de ahí, las posibilidades de la bioingeniería aplicada a la producción y a la terapia parecían tan numerosas como alcanzables.



La resistencia que pudieron oponer a esa imagen los científicos y filósofos reunidos por Ayala y Dobzhansky fue más bien tenue, y no logró vencer lo que podríamos llamar el sino de los tiempos. La corriente reduccionista seguía avanzando inexorablemente a la sombra de los éxitos de la genética molecular. Quizás el más claro exponente de esta corriente fue el famoso libro de Richard Dawkins titulado *El gen egoísta* (1976). En él se produce ya la reducción ontológica de todo lo vivo a lo genético. Los organismos son meros vehículos instrumentalizados por los genes. Lo que de verdad existe son los genes, el resto es epifenómeno. Todo está en los genes. Ellos poseen las instrucciones para construir los vehículos que les permiten viajar de una generación a otra, hasta casi los lindes de la inmortalidad. El flujo de información, como la causalidad, conoce un único sentido, desde los genes hacia el organismo (*bottom-up*), y la selección natural hace diana solo en los genes.

En esa atmósfera cobraba perfecto sentido el PGH. Si todo está en los genes, conozcamos exhaustivamente los nuestros y sabremos todo lo que se precisa para manejar la vida humana, o al menos sus patologías. Podremos diagnosticar los males, incluso predecirlos, y posiblemente curarlos mediante terapias génicas. Estas esperanzas se fraguaron y fueron transmitidas al público durante la época de auge de la perspectiva reduccionista.

La idea del PGH fue madurando a lo largo de los años ochenta y se puso en marcha en 1990. Un proyecto de este calibre depende del estado de la biología, pero también de la capacidad de computación e incluso de la coyuntura política

y económica. En el momento en que esta constelación de factores fue favorable, la maquinaria se puso en marcha, liderada, significativamente, por uno de los descubridores de la estructura del ADN, James Watson. El PGH fue la cara visible de la *big science* en el último tramo del siglo xx, algo análogo a lo que supuso el Proyecto Manhattan medio siglo antes. El sufijo griego *–oma* refiere a una totalidad. Así, el Proyecto Gen-*oma* Humano buscaba la identificación de *todos* los genes humanos.

En 2001 se presentó con toda suerte de honores políticos y mediáticos, de forma simultánea en varios países, un borrador de resultados; en 2003 apareció la secuenciación completa del genoma humano. Hablando en términos kuhnianos, se trataba de un éxito indudable de lo que entonces era *ciencia normal*, desarrollada dentro del paradigma dominante. Y, sin embargo, ese mismo año, *Genome Research* se permitía publicar un artículo encabezado por la perturbadora frase que citábamos al comienzo.

¿Paradoja? En 2003 el PGH era considerado como un gran éxito de la ciencia. Incluso antes de lo previsto había logrado su objetivo. Pero, por otra parte, empezaban a asomar signos de decepción. En cierto sentido resultaba también un fracaso, ya que las gigantescas expectativas que se habían instalado en la opinión pública no se vieron cumplidas. Al parecer, no todo estaba en los genes. Para empezar, se encontraron en un número inferior al previsto. Resultó que no tenemos ni siquiera 30.000. Muy pocos para tanta carga informativa como se les atribuía. Además, parte del material genético parece poco significativo. Junto a ello, se descubrió que la expresión de los genes se halla modulada por otros genes y por factores epigenéticos. Por añadidura, la expresión genética está condicionada por patrones de desarrollo y por factores ambientales. Súmese a ello el hecho de que en la construcción de un solo rasgo fenotípico pueden estar implicados muchos genes y un solo gen puede trabajar en la de varios rasgos.

He aquí la paradoja. Éxito y fracaso a un tiempo. ¿Cómo interpretarlo? En realidad el PGH constituyó un gran éxito de la investigación biológica. Sin embargo, no satisfizo todas las esperanzas puestas en él. De ahí el sentimiento de fracaso, que no deriva del propio PGH, sino de la distancia entre sus resultados y las expectativas generadas por la mentalidad reduccionista. Precisemos: el reduccionismo metodológico nos ha aportado importantes resultados y una ingente cantidad de datos, pero el reduccionismo ontológico, a la postre, se ha revelado erróneo. Simplemente, no es verdad que los organismos sean meras máquinas de supervivencia controladas por los genes. La metáfora del gen egoísta confunde más que orienta. El cardiólogo Denis Noble, de la Universidad de Oxford, ha propuesto en fecha reciente que pasemos a la metáfora del «gen cautivo» en el interior del organismo.

La nueva biología no considera los organismos como simples cúmulos de moléculas o instrumentos de sus genes

Más allá de los genes, el nivel epigenético resulta de primera importancia para la comprensión de la vida, así como las proteínas y las vías metabólicas. La célula en su conjunto y el ambiente en el que vive también tienen influencia sobre el desarrollo de los tejidos y del organismo. El organismo como tal posee una cierta autonomía y es agente de su propio desarrollo y comportamiento. Llega incluso a modificar el comportamiento de sus partes y hasta de sus genes. Desde un punto de vista aún más amplio, el entorno en el que viven los organismos ha de ser tomado en consideración para entender los fenómenos biológicos. Todos estos niveles tienen su propia autonomía y consistencia ontológica. Son irreductibles a la base genético-molecular.

Por ello hablamos ya de biología postgenómica. Por eso se han puesto en marcha proyectos para estudiar el epigenoma, el proteinoma, el metaboloma... Todas estas ciencias *ómicas* están produciendo una enorme cantidad de datos que se pueden gestionar solo gracias al avance en paralelo de la bioinformática. Coincide la aparición de estas disciplinas con el auge de la biología del desarrollo, con la nueva síntesis entre esta y las teorías evolucionistas (evo-devo), y con el crecimiento de otras ramas naturalistas de las ciencias de la vida, como la etología y, sobre todo, la ecología. Pero quizá la línea de investigación más representativa de este nuevo ambiente intelectual sea la biología de sistemas.

De ese modo hemos cambiado la perspectiva, estamos haciendo ya otro tipo de biología. El paradigma ha cambiado. Es justo decir que «hay una revolución en marcha dentro de las ciencias biológicas». Los genes han dejado de ser obsesión única. Es la vida en su complejidad jerárquica, en todos sus niveles, en sus aspectos dinámicos, relacionales, no lineales, la vida desde una perspectiva holista, sintética y sistémica la que ha pasado a ocupar el centro de la investigación. Paradójicamente, el éxito de una metodología reduccionista ha producido la quiebra de una ontología reduccionista. ¿Qué implicaciones filosóficas puede tener esta nueva forma de hacer biología?

M. A. O'Malley y J. Dupré, de la Universidad de Exeter, en un artículo titulado «Fundamental issues in systems biology», publicado en 2005 en *Bioessays*, sostienen que la filosofía puede contribuir positivamente al desarrollo de la biología postgenómica, y al mismo tiempo que esta tiene serias implicaciones filosóficas. Por ejemplo, la nueva biología no considera los organismos como simples cúmulos de moléculas o instrumentos de sus genes. Esto abre oportunidades para una ontología razonable y para una ética respetuosa con los vivientes, incluso para una biología más humana y humanística.

No obstante, el cambio de perspectiva no se halla exento de riesgos. El riesgo principal, a mi parecer, es el de transitar desde una filosofía excesivamente reduccionista hacia otra excesivamente holista. Esta última quizá sea más acorde con el nuevo sino de los tiempos —pensemos en el enorme éxito que ha tenido una película tan holista como *Avatar*—, pero tal vez resulte igualmente amenazadora para el reconocimiento y respecto de los organismos.

PARA SABER MÁS

Systems biology. Philosophical foundations. Dirigido por Fred C. Boogerd *et al.* Elsevier, 2007.
La música de la vida. Denis Noble. Akal, 2008 [2006].
Contemporary debates in philosophy of biology. Dirigido por Francisco J. Ayala y Robert Arp. Wiley-Blackwell, 2010.
Revolución aplazada. Stephen S. Hall en *Investigación y Ciencia* n.º 411, págs. 30-38, diciembre de 2010.
Information and living systems. Philosophical and scientific perspectives. Dirigido por George Terzis y Robert Arp. MIT Press, 2011.

por Carlos Gracia

Carlos Gracia es profesor del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona e investigador del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales.



Bosques y cambio climático

Los planes de gestión forestal deberían atender las necesidades hídricas y las limitaciones fisiológicas de las plantas

¿Le gustaría a usted que la superficie forestal de la región en la que vive se viera incrementada en el futuro? Muy probablemente dirá que sí. Si ello ocurriera, ¿cree usted que cuando abriera el grifo de su casa seguiría saliendo agua para satisfacer sus necesidades? Seguramente su respuesta será también afirmativa. Pues bien, puede que se trate de opciones incompatibles. O una cosa o la otra.

Se nos repite que el ochenta por ciento del agua se consume en el regadío agrícola. No debería sorprendernos. A menudo olvidamos que la fotosíntesis, el proceso básico por el que las plantas sintetizan sus tejidos, frutos, madera y restantes bienes que nos proporcionan, tiene un coste hídrico elevadísimo. Los bosques no son la excepción: la producción de 1 metro cúbico de madera requiere entre 600 y más de 1000 metros cúbicos de agua.

A pesar de que la vida a nuestro alrededor depende de y está limitada por el agua —en España las precipitaciones son, en conjunto, más bien escasas—, nos hemos instalado en una sociedad *carbocéntrica* en la que la gestión de los sistemas naturales y, en particular, los bosques, tiene como principal objetivo la fijación de carbono. Hay que combatir el cambio climático a la vez que se produce madera, ya sea para consumo directo o para aprovecharla como fuente de energía o, por qué no, según algunos, para transformarla en bioetanol que acabe alimentando nuestros vehículos. Pero esta idea, que a menudo tratan de vendernos políticos y gestores, no es sino el reflejo del desconocimiento de cómo funcionan nuestros sistemas forestales.

En el mejor de los casos, el bosque en España viene a fijar algo menos del ocho por ciento del CO_2 que emitimos a la atmósfera. Ello lo hace a expensas de un notable consumo de agua, un recurso ya de por sí escaso en nuestra región: un área de bosque denso puede llegar a transpirar hasta el noventa por ciento de la precipitación anual que recibe. El bosque transpira agua y, a cambio, fija carbono y crece, lo que le permite desempeñar funciones ecológicas cruciales.

Dado ese delicado balance entre agua disponible y agua utilizada por el bosque ¿no deberíamos introducir en la gestión de nuestros bosques el papel del agua, siendo como es la variable más importante y más limitante para su crecimiento? Se trata de repensar el modo en que gestionamos nuestras masas forestales desde una perspectiva global, teniendo en cuenta las limitaciones que impone el funcionamiento del ecosistema.

En ese sentido, quienes defienden el aprovechamiento de la biomasa vegetal como fuente alternativa de energía renovable harían bien en explicar —más allá de sus intereses empresariales y de sus aspiraciones a los subsidios amparados en el dinero público— cómo piensan estimular la producción de esta biomasa a expensas del bien más escaso que tenemos en el mediterráneo, el agua, por no hablar de la exportación de nutrientes. Al aprovechar las fracciones más finas de los árboles para producir energía en lugar de permitir su descomposición y retorno de los nutrientes al suelo, se produce un desequilibrio que a medio plazo puede comprometer la fertilidad sin que, en ningún caso, la energía que nos proporciona esa biomasa llegue a reemplazar ni siquiera el uno por ciento de la energía que consumimos. ¿Tiene sentido poner en peligro la funcionalidad de nuestros bosques para producir tan exiguas cantidades de energía?



¿Estamos dispuestos a repetir el fiasco que están suponiendo los biocombustibles, que apenas reemplazan la energía invertida en la preparación del terreno, el propio cultivo y el proceso industrial de transformación, incluido, a menudo, el transporte a largas distancias? Y todo ello al precio de provocar graves conflictos sociales como en México, donde se desvía maíz de la alimentación a la producción subsidiada de bioetanol en EE.UU.; Argentina, donde se destruyen enormes extensiones del Chaco (bosque nativo subtropical) para plantar colza, cuyo aceite se destina a la producción de biodiesel; o países del sudeste asiático, en los que abundan las plantaciones de *Jatropha* y otras especies destinadas al mismo fin.

La única vía para combatir el cambio climático pasa por reducir las emisiones, proceso ciertamente difícil, que, como ha quedado demostrado, no puede ser liderado por los políticos, siempre atentos a su permanencia y con miras a las próximas elecciones.

La gestión del bosque requiere una reflexión profunda. La amenaza del cambio climático impone retos que nos quieren vender como oportunidades quienes ignoran que las plantas no pueden fijar más del uno por ciento de la energía solar —he aquí el cuello de botella para el negocio de la biomasa— y que su limitada capacidad de producción no puede dar respuesta a nuestra insaciable sociedad de consumo. Son las limitaciones que impone la fisiología las que deberían presidir nuestra toma de decisiones en la gestión forestal.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA / ALBERT MARÍN

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA** Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES** Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA** La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE Y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Bajo el agua

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



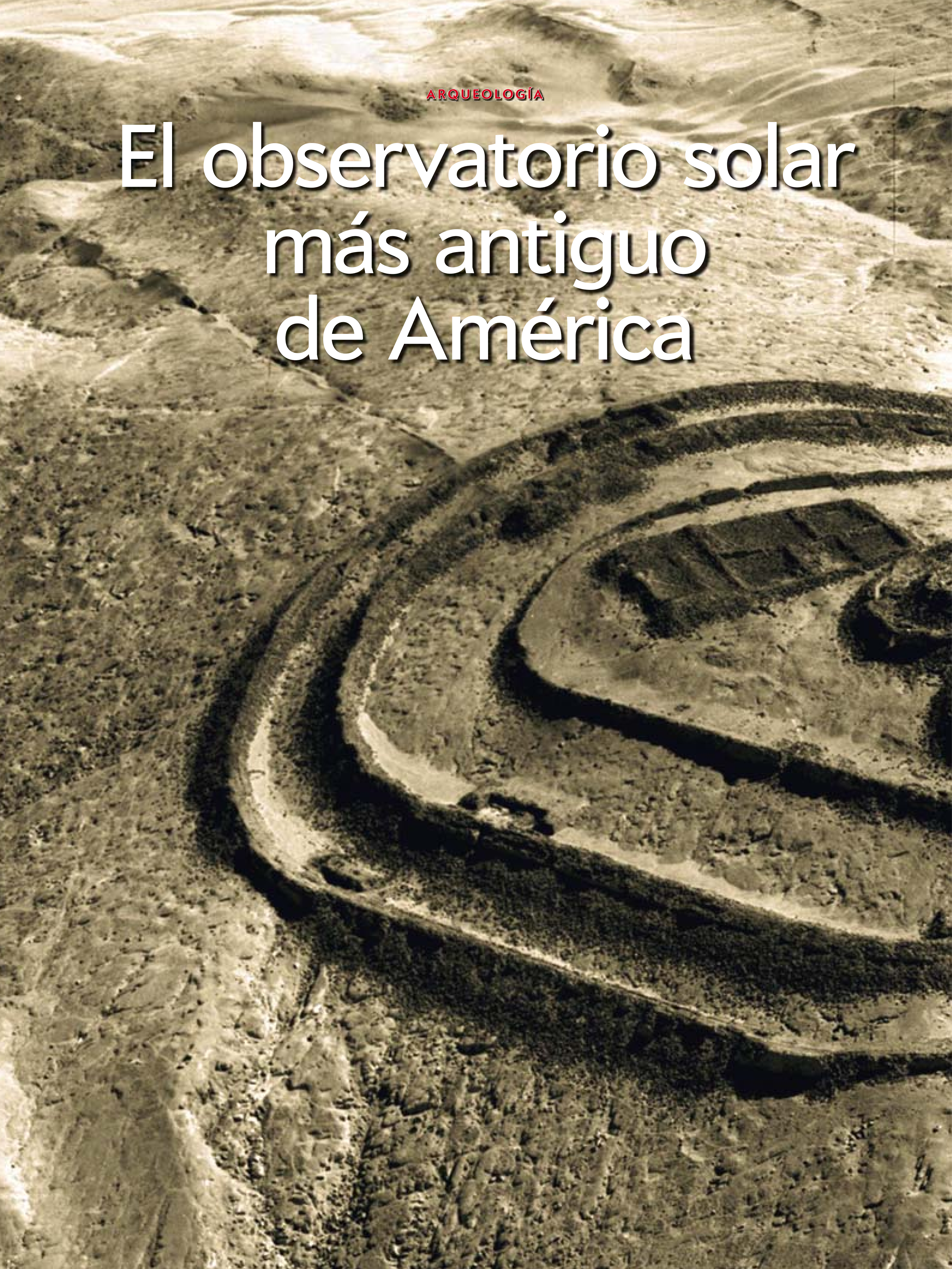
GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos
España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA
España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es



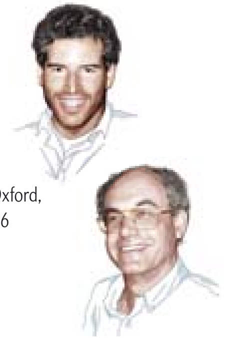
El observatorio solar más antiguo de América

El complejo ceremonial de Chankillo, en Perú, fue habitado en el siglo IV a.C. Las investigaciones revelan que servía a un refinado culto solar muy anterior a los incas

Iván Ghezzi y Clive Ruggles

La fortaleza: Esta imponente estructura, de 300 metros de largo, es el elemento más reconocible de Chankillo. Su función ha sido objeto de numerosas interpretaciones. Las últimas investigaciones arqueológicas sugieren que quizá se tratase de un templo fortificado.

Iván Ghezzi es doctor en arqueología por la Universidad de Yale. Ha investigado la arqueología de las sociedades complejas de los Andes centrales. En la actualidad es profesor de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



Clive Ruggles, doctor en astrofísica por la Universidad de Oxford, es profesor emérito de la Universidad de Leicester. Entre 2006 y 2010 fue presidente de la Sociedad de Prehistoria.



En la costa peruana, unos cuatrocientos kilómetros al norte de Lima, se alza el complejo de Chankillo, cuya antigüedad se estima en unos 23 siglos. A lo largo de los años, su función ha sido objeto de diversas interpretaciones. Se ha postulado que pudo servir como fortaleza, refugio, a modo de templo enclaustrado o incluso que podría haber constituido un centro de batallas rituales. Nuestras investigaciones, sin embargo, sugieren que se trataba de un gran centro ceremonial dedicado al culto al sol. En otras palabras, lo que podríamos calificar como el observatorio solar más antiguo de América.

En el campo de la arqueoastronomía, el término «observatorio» debe emplearse con cautela, pues a menudo invoca imágenes, evidentemente etnocéntricas, de antiguos «astrónomos». No obstante, el estudio de los lugares desde los que las civilizaciones primitivas practicaban observaciones celestes, junto con la naturaleza y el contexto de dichas observaciones, aportan información valiosa sobre el modo en que esas culturas percibían, ordenaban y controlaban el mundo.

Hoy sabemos que los calendarios de horizonte solar (basados en la observación de las posiciones cambiantes de la salida y puesta del sol a lo largo del horizonte) gozaban de gran importancia entre los pueblos indígenas de América. En la civilización maya, el reconocimiento y la predicción de los ciclos celestes con propósitos de adivinación y pronóstico fueron mucho más allá de la necesidad de regular los ciclos anuales de actividad de acuerdo a los cambios estacionales. En otras partes de Mesoamérica, el estudio de la orientación de edificios sagrados y planos de ciudades sugiere la existencia de calendarios de horizonte solar en los que se atribuía especial importancia a fechas clave. Además de los solsticios, estas incluían las fechas de pasaje del cenit y otras calculadas a partir de este a intervalos significativos, todo ello dentro de los complejos ciclos entrecruzados del calendario mesoamericano.

En Sudamérica, las crónicas revelan la existencia de prácticas rituales y creencias cosmológicas relativas a un culto solar regulado por el Estado inca. Ello apunta a un gran interés por el movimiento de los cuerpos celestes y por el calendario; asímismo, sugiere que los rituales de culto solar fueron orquestados por los gobernantes para sustentar su origen divino, centralizar el poder y legitimar su autoridad. Se han sugerido varios esquemas que los incas habrían empleado para regular el calendario a través del paisaje. Tales propuestas se apoyan en pruebas históricas y en el análisis de la disposición espacial de la arquitectura sagrada, como el sistema de ceques (líneas imaginarias a lo largo de las cuales se disponían localizaciones de carácter sagrado) del Cuzco.

Los Pilares del Sol, por ejemplo, fueron descritos por varios cronistas como grandes columnas de piedra ubicadas de modo que fuesen visibles en el horizonte desde el Cuzco. Se habrían empleado para marcar los tiempos de siembra y cosecha, así como para regular otras prácticas estacionales. Por desgracia, desaparecieron sin dejar rastro; desde entonces, su ubicación precisa permanece —y posiblemente siempre permanecerá— desconocida. Como resultado, no existe hoy en día un consenso sobre la función que los Pilares del Sol habrían desempeñado en la observación solar (o quizá también en la lunar, como han sugerido algunos investigadores).

Una cuestión fundamental es la relativa a la naturaleza de las creencias cosmológicas y las prácticas calendáricas de las sociedades que precedieron a los incas. ¿Podrían las prácticas de observación y de culto al sol datar de mucho antes? Tales preguntas se remontan en el tiempo más allá de los primeros cronistas, por lo que para responderlas solo podemos basarnos en los medios que nos brinda la arqueología. Los problemas que se presentan al interpretar datos de alineamientos (o, de modo general, de patrones espaciales) en ausencia de pruebas históricas que los corroboren son ampliamente conocidos en arqueoastronomía y, a menudo, desalentadores. En este contexto, el complejo de Chankillo constituye una afortunada excepción: hoy podemos afirmar casi con total certeza que, en el pasado, sirvió a la observación de la salida y puesta del sol a lo largo del año.

UN RECORRIDO POR CHANKILLO

Chankillo conforma un centro ceremonial ubicado en el ramal sur de la cuenca del río Casma, en el desierto costero de Ancash. Excavaciones recientes nos han permitido certificar la antigüedad del complejo en unos 2300 años. Contiene múltiples edificios, plazas y patios construidos con piedra canteada y mortero de barro, y se alza sobre unos cuatro kilómetros cuadrados de terreno compuesto por pampas de arena, afloramientos rocosos, dunas y bosques de algarrobo.

EN SÍNTESIS

Chankillo conforma un centro ceremonial ubicado en el ramal sur de la cuenca del río Casma, en el desierto costero de Ancash. Fue habitado en el siglo IV a.C.

Se ha demostrado que el misterioso complejo servía a modo de «observatorio» solar: la disposición de sus estructuras permitía seguir con gran precisión los movimientos del sol a lo largo del año.

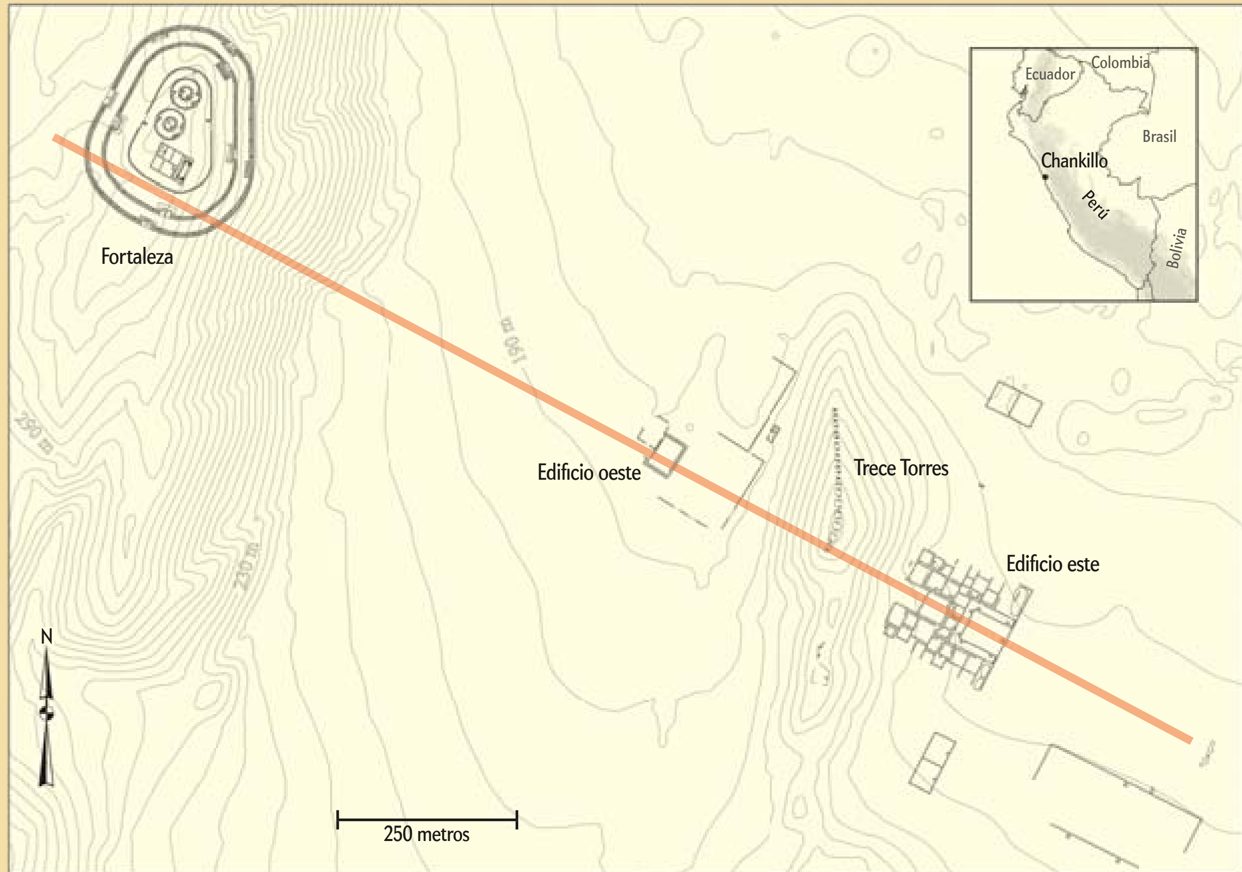
Ello permitió a sus pobladores la confección de un calendario. Su estudio aporta información única sobre la organización social de las culturas anteriores a los incas.

CORTESÍA DEL SERVICIO AEROFOTOGRÁFICO NACIONAL, PERÚ (*doble página anterior*)

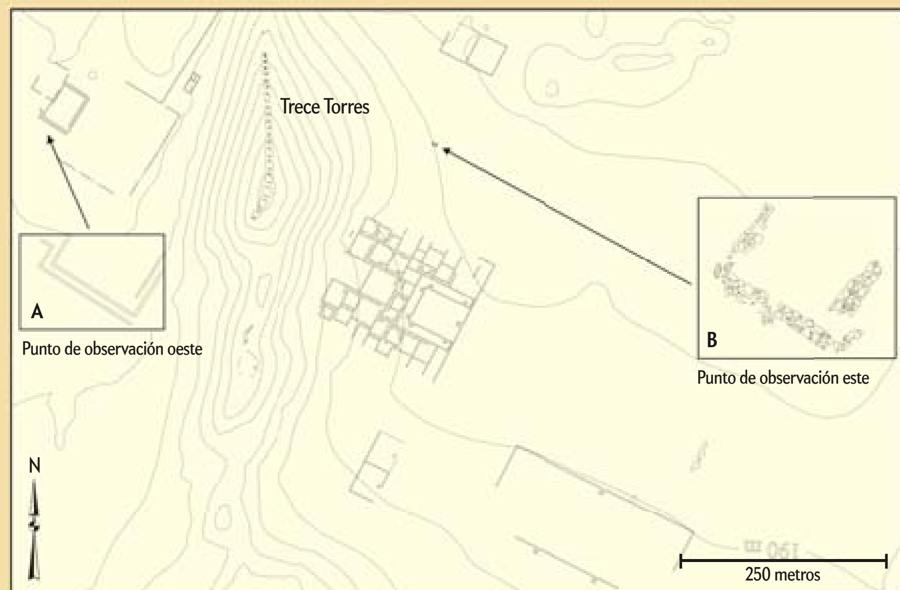
PRUEBA ARQUEOLÓGICA

Un culto solar anterior a los incas

El complejo de Chankillo estuvo habitado hace unos 2300 años. Contaba con un templo fortificado y múltiples edificios, plazas y patios. Las investigaciones efectuadas por los autores demostraron que las Trece Torres, una enigmática estructura central, servían para marcar la posición de salida y puesta del sol a lo largo del año.



La fortaleza, el edificio al oeste de las torres, la torre más al sur y el edificio este se encuentran sobre un mismo eje, de orientación sudeste (*línea naranja, arriba*). Ese eje coincide, de manera muy aproximada, con el que definen la salida del sol en el solsticio de diciembre y la puesta del sol en el de junio. Unos 250 metros al oeste (*A*) y este (*B*) de las Trece Torres se alzaban dos estructuras simétricas cuya función no parece haber sido otra que la observación de las torres. En esos puntos se han hallado restos de ceremonias rituales.





Las Trece Torres: El horizonte artificial que formaba la estructura (aquí, vista desde el templo fortificado) servía para marcar las posiciones de salida y puesta del sol a lo largo del año.

El componente más conocido del complejo es la llamada «fortaleza»: una imponente estructura de 300 metros de largo ubicada estratégicamente en la cumbre de una colina y defendida por grandes murallas, accesos restringidos, parapetos y, con toda probabilidad, un foso seco (*véase la fotografía que abre este artículo*). Su función ha sido objeto de numerosas interpretaciones: fortaleza, reducto o incluso centro ceremonial. Las últimas investigaciones arqueológicas, sin embargo, sugieren que quizá se tratase de un templo fortificado.

Un sector mucho menos conocido lo constituye una gran área cívico-ceremonial al este de la fortaleza, la cual incluye numerosos edificios, plazas, patios y depósitos. Su elemento más sobresaliente son las Trece Torres: una fila de trece construcciones cúbicas de piedra canteada y mortero de barro sobre la cresta de una colina baja, situada aproximadamente en el centro de Chankillo. La hilera de torres exhibe una orientación norte-sur, si bien las torres 11, 12 y 13 (la primera es la situada más al norte) muestran un cambio de dirección hacia el sudoeste. Las torres forman un horizonte artificial «dentado», con picos y valles dispuestos a intervalos regulares.

Aunque las torres se han conservado bastante bien, las esquinas superiores y algunos muros internos han colapsado en parte. Las torres no son idénticas: la planta puede ser rectangular o romboidal, sus alturas respectivas comprenden entre dos y seis metros, y su volumen oscila entre los 150 y 750 metros cúbicos. Lo que sí presenta una gran regularidad es el espaciado entre las torres: los intervalos que las separan varían solo entre 4,7 y 5,1 metros. Cada torre cuenta, en sus lados norte y sur, con un par de escalinatas estrechas y empinadas que llevan a la cúspide. A diferencia de las escalinatas del lado sur, que se hallan desplazadas hacia el este, la mayoría de las del lado norte se hallan en el centro. Las cúspides, con suelo de arena o de lajas de piedra muy pequeñas, se encuentran por lo general bien preservadas. La existencia de escaleras de acceso parece demostrar que las cimas fueron focos de actividad.

A unos 250 metros al oeste de las torres se ubica un grupo de recintos y otras estructuras. Entre ellos destaca un edificio compuesto por dos patios rectangulares adyacentes. El patio al sudeste, de 53,6 por 36,5 metros, fue construido con cuidado, enlucido y pintado de blanco. En el muro perimétrico sur del edificio se adosa una construcción muy particular: un corredor de 40 metros de largo y 2,5 de ancho, asimismo enlucido y pintado de blanco. De manera sorprendente, este no conduce al interior del edificio; tan solo conecta el acceso noroeste, restringido mediante paredes de cierre, con una abertura al sudeste orientada directamente hacia las Trece Torres. A diferencia de todas las entradas típicas de Chankillo, esta abertura carece de cajuelas (los pequeños nichos donde una piedra clavada en la mampostería se usaba para atar una puerta de madera).

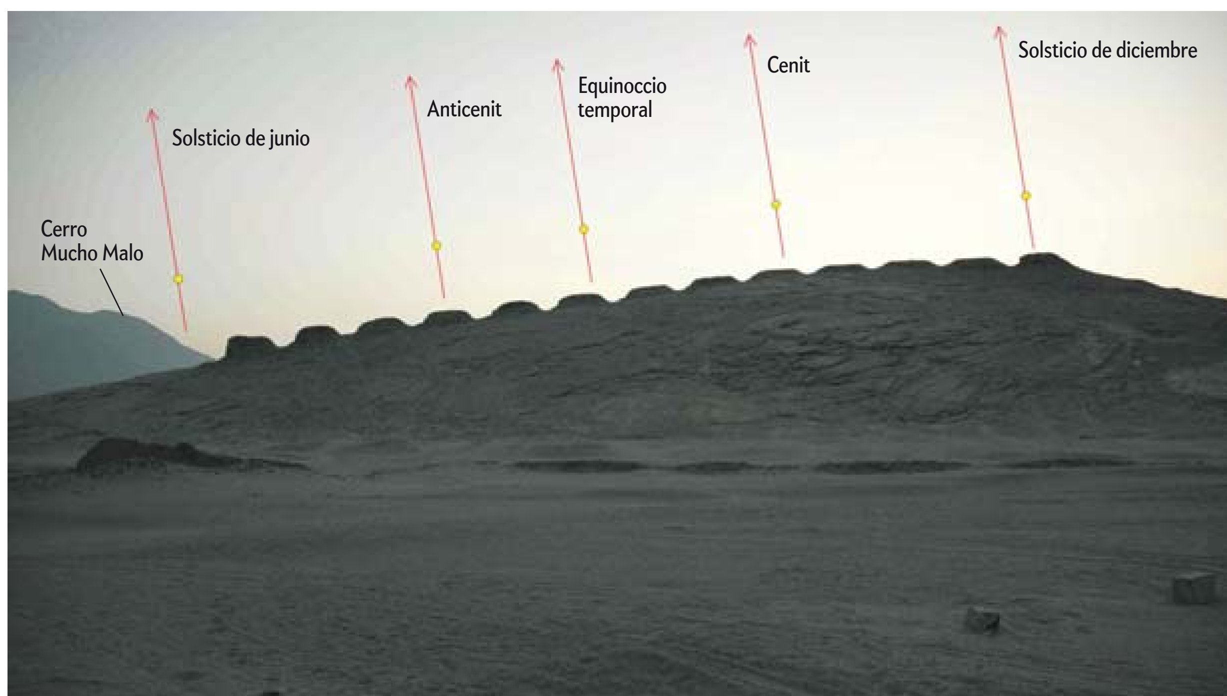
Podemos concluir que el corredor servía para regular el movimiento desde la entrada de acceso restringido hacia la abertura orientada a las torres. La altura original de las paredes, estimada en unos 2,2 metros, impedía la visibilidad hacia el exterior. Sin embargo, al llegar a la abertura se aprecia sin obstáculos la «sierra» formada por las Trece Torres. En excavaciones efectuadas en la abertura se hallaron ofrendas de cerámica, moluscos y útiles líticos, lo que sugiere la existencia de un ritual asociado al proceso de atravesar el corredor y detenerse en su extremo para contemplar las torres. A esta abertura la hemos denominado «punto de observación oeste».

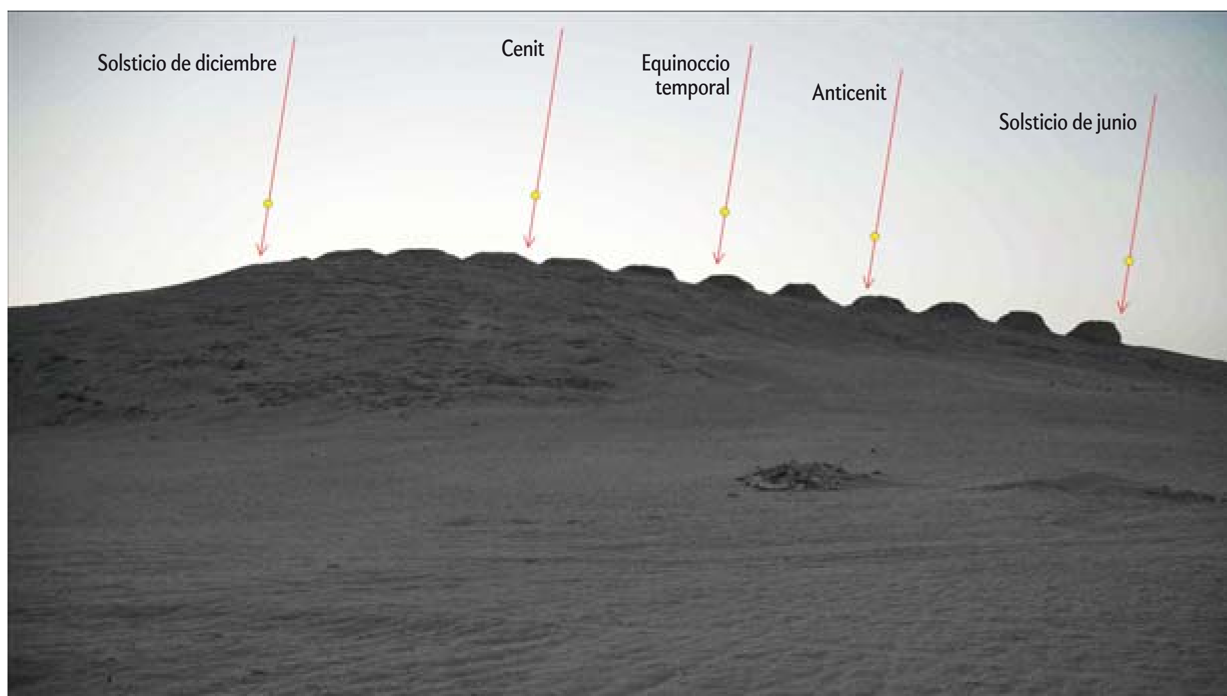
Al este de las torres se encuentra un gran espacio abierto, con un complejo de cuartos interconectados, otros edificios menores y depósitos alrededor de una gran plaza. Esta no se halla limitada por muros ni edificios en todos sus lados; sin embargo, es reconocible por la evidente modificación del terreno, que ha sido aplanado, rellenado en parte y limpiado por completo de

El sol y las torres en el año 300 a.C.

El equipo de los autores efectuó una comparación detallada entre la posición de las torres y los lugares de salida y puesta del sol en el año 300 a.C. Desde el punto de observación oeste (*arriba*), la salida del sol en el solsticio de diciembre se correspondió aquel año con la posición de la torre situada más al sur. En el solsticio de junio, el sol salió entre las laderas del cerro Mucho Malo, probablemente considerado como una «torre» más. Desde el punto de observación este (*abajo*), las torres marcaban los ocasos en fechas señaladas.

En su tiempo, las cimas de las torres formaban un «horizonte dentado»: este quedaba subdividido en intervalos muy regulares por los cortes profundos y estrechos entre las torres. Todo parece indicar que los días en que el sol salía entre el espacio entre dos torres (apenas uno o dos días) marcaban las divisiones del calendario.





escombros. En varios lugares de la plaza se hallaron aparentes ofrendas de antaras de cerámica y mullus (*Spondylus princeps* sp.); en sus alrededores, basureros con restos de vasijas utilitarias, antaras y maíz. Todo parece indicar que en esta área tenían lugar grandes reuniones y banquetes ceremoniales.

Las Trece Torres, por su ubicación elevada y su carácter monumental, constituyen uno de los elementos dominantes del paisaje. Se aprecian a simple vista desde múltiples ubicaciones del espacio ceremonial que conforma la plaza. Sin embargo, un edificio en particular, pequeño y relativamente aislado en un extremo de la plaza resulta de sumo interés. Su localización con respecto a las Trece Torres es un reflejo del punto de observación oeste: ambos se encuentran casi sobre la misma línea este-oeste, a la misma elevación y a una distancia muy similar de las torres. Desde el interior de este edificio, las Trece Torres conforman también una disposición de picos y valles emplazados a intervalos regulares sobre el horizonte.

Las excavaciones arqueológicas en ese edificio revelaron la planta incompleta de un recinto rectangular de seis metros de ancho. Se encuentra mal conservado, pues, además de haber sufrido el paso del tiempo, parece haberse desmontado casi hasta los cimientos en algún momento posterior a su abandono. Al igual que el corredor que nos conduce al punto de observación oeste, el recinto presenta también un acceso restringido por un pequeño muro de cierre. Inferimos que esta estructura debía proporcionar un punto de observación este, si bien no podemos conocer su posición con la misma exactitud que en el caso del punto de observación oeste.



Escaleras de acceso: Cada torre contaba con dos escalinatas que permitían subir a la cima. Aquí se muestra la escalinata norte de la torre situada más al norte.

ALINEAMIENTOS

La estructura de Chankillo exhibe una clara orientación sudeste, con un azimut de 118 grados. Esta queda definida por un eje de 3,2 kilómetros de largo que atraviesa la fortaleza, el edificio al oeste de las torres, la torre más al sur, la escalinata de acceso del edificio al este de las torres y una pequeña plataforma en la plaza, entre otras estructuras (*véase el recuadro* «Un culto solar anterior a los incas»). Este eje claramente definido coincide, de manera muy aproximada, con el eje que definen la salida del sol en el solsticio de diciembre y la puesta del sol en el solsticio de junio.

Desde los dos puntos de observación, la extensión de las torres en el horizonte abarca el intervalo de las posiciones de la salida y puesta del sol a lo largo del año. Ello supone una indicación de que las torres debían desempeñar una función relevante en la observación solar. Nuestro equipo efectuó un estudio detallado de la posición de las torres y la comparó con los lugares calculados de salida y puesta del sol en el año 300 a.C.

Desde el punto de observación oeste, la salida del sol en el solsticio de diciembre se correspondió aquel año con la posición de la torre situada más al sur. Por otra parte, el día del solsticio de junio, el sol salió entre las laderas del cerro Mucho Malo (distante tres kilómetros) y el horizonte formado por la colina en que se encuentran las torres. La simetría evidente que, desde el punto de observación oeste, guarda la posición del cerro Mucho Malo con la del resto de las torres sugiere que la colina era interpretada como la «torre» del extremo izquierdo. Así, en el solsticio de invierno, el sol aparentemente emergía desde una colina natural y no desde una construcción humana.

El cambio de orientación de las torres 11, 12 y 13 provoca que, desde el punto de observación este, la última torre no sea visible en absoluto. Cabe suponer que solo habría sido visible la cima de la torre 12, si bien hoy en día, debido a su estado de preservación, esta tampoco puede verse. Desde aquí, el ocaso del sol en el solsticio de diciembre se observó en el lado izquierdo de la torre 12. En el solsticio de junio, el sol se puso justo a la derecha de la primera torre.

Desde ambos puntos de observación, cuando el sol empezaba a distanciarse de sus posiciones extremas, unos días después de cada solsticio, las torres habrían proporcionado medios para rastrear el recorrido del sol a lo largo del horizonte con una exactitud de dos o tres días. Si aceptamos que el propósito principal de las Trece Torres fue servir como marcadores de horizonte para observaciones solares, ¿puede su disposición espa-



Chankillo, hoy: El amanecer del día del solsticio de junio, entre cerro Mucho Malo y la primera torre, visto desde el punto de observación oeste. Desde el año 300 a.C., la posición de la salida del sol en el solsticio se ha movido hacia la derecha unos 0,3 grados.



JOSÉ LUIS DÍAZ CARRANZA

Guerreros en combate: Reconstrucción artística de la decoración hallada en algunas vasijas. Estas representaciones indican el posible ascenso social de una clase de líderes guerreros.

cial darnos alguna luz sobre la forma en que el año hubiera sido subdividido?

En su tiempo, las cimas de las torres formaron un horizonte artificial: su altura variable compensaba la pendiente de la colina sobre la que fueron construidas. Este horizonte artificial se subdividía en intervalos regulares por cortes profundos y estrechos, formados por los espacios entre las torres. Cuando se utilizaba el punto de observación oeste, el sol salía solo durante uno o dos días entre cada uno de los espacios entre las torres. ¿Indicaban esos intervalos fechas clave a lo largo del año? La regularidad del espaciado entre las torres parece contradecir esta posibilidad y sugiere, en cambio, que el calendario se dividía en intervalos uniformes. Las salidas del sol en los espacios entre las torres centrales (de la tercera a la undécima torre) se hallaban separadas por lapsos de unos diez días. Esos intervalos son más largos entre las torres extremas (primera y segunda, y duodécima y decimotercera), pues, cuando el sol se acerca al solsticio, su recorrido a lo largo del horizonte se torna más lento. La situación difiere desde el punto de observación este, ya que desde él no se ve la torre más sureña; los espacios restantes corresponden a intervalos de once o doce días entre las puestas de sol.

¿Podrían otras fechas del año, además de los solsticios, tener una importancia particular? En tal caso, la salida u ocaso del sol en esas fechas se correspondería con alguno de los espacios entre las torres. Cabe mencionar que la salida del sol el día del equinoccio tiene lugar en el espacio central entre las torres 6 y 7. Si contamos el cerro Mucho Malo como una «torre» más, esta posición equinoccial es, además, la central. Desde la dirección opuesta, el ocaso equinoccial ocurre justo a la derecha de este mismo espacio, el cual coincide con el espacio central de las doce torres visibles desde ahí.

La definición de equinoccio en un contexto ajeno al occidental quizá resulte cuestionable. Dado que todo parece indicar que los moradores de Chankillo disponían de un mecanismo para contar los días, quizá su «equinoccio» se correspondiese con el denominado «equinoccio temporal» o «de Thom»: el día del año que equidista de ambos solsticios. Sin embargo, la posición de salida del sol en ese día del año 300 a.C. no coincide con ningún lugar marcado por las torres de manera especial.

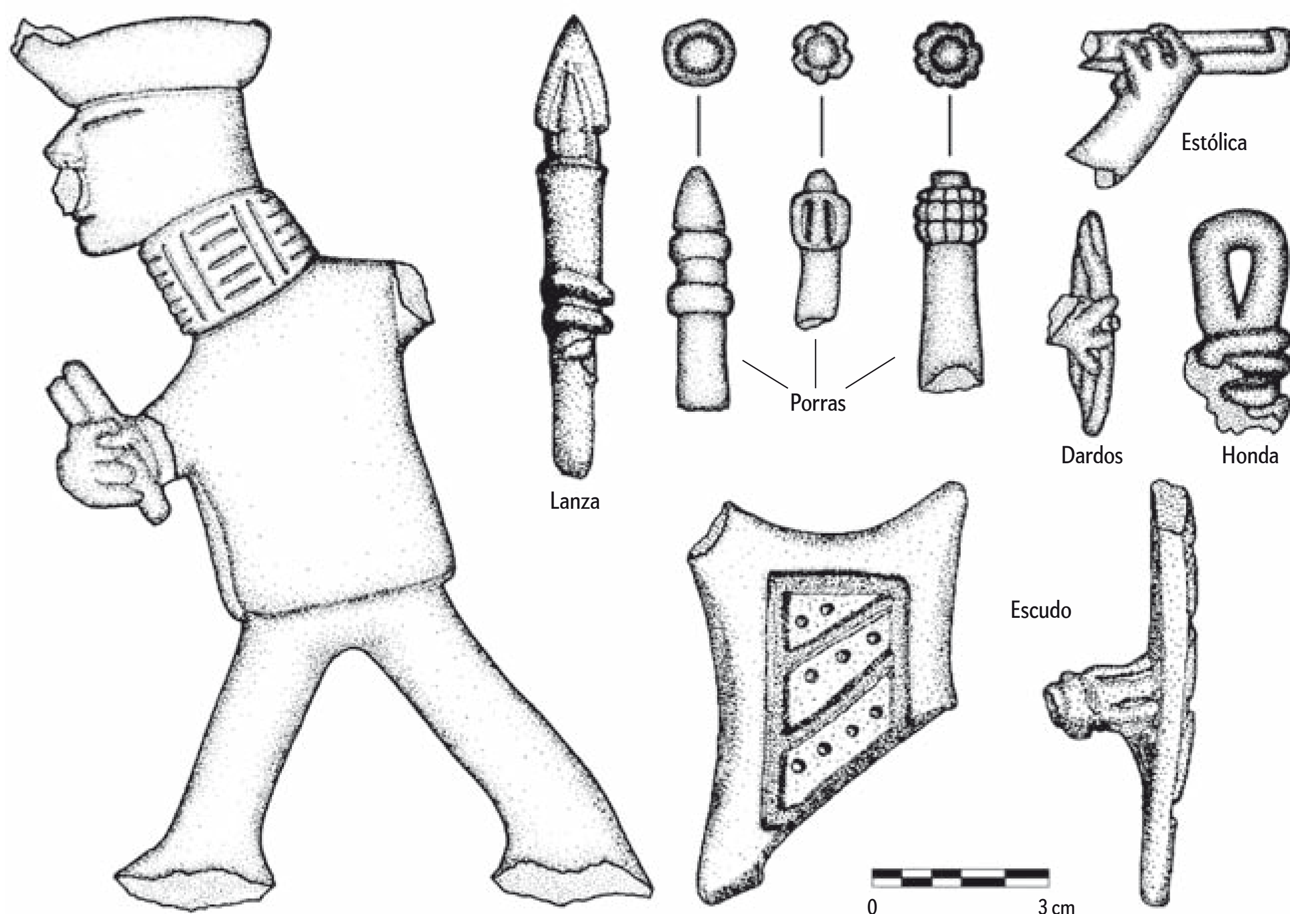
Otras fechas que debemos considerar son el pasaje de cenit y anticenit solar. Existen diversas pruebas que sugieren que esos días revestían una gran importancia en algunas culturas precolombinas, en particular en la región de los Andes. Otras investigaciones parecen apuntar a la relevancia del anticenit en el Cuzco, si bien se trata de una hipótesis controvertida. Sin embargo, ninguna de las salidas u ocasos del sol en las Trece Torres de Chankillo coincide con estas fechas. Solo el ocaso del día de pasaje de cenit se produce cerca de un espacio entre dos torres, si bien no exactamente allí.

Así pues, la posición de las Trece Torres desde los puntos de observación este y oeste parece sugerir que Chankillo servía como observatorio solar a fin de regular un calendario estacional. Los solsticios se hallaban claramente marcados, y es posible que el equinoccio también. El espaciado entre las torres parece indicar la importancia de los ciclos de diez días en el calendario.

ASTRONOMÍA Y PODER

La arquitectura ceremonial o sagrada suele asociarse a la percepción dominante que una cultura posee del mundo: su orientación puede señalar un evento astronómico notable, o su diseño quizá pretenda dotar a un lugar del «poder sagrado» asociado a una fecha señalada. Aun así, en el caso de culturas antiguas, las conclusiones al respecto deben establecerse desde sus propios esquemas de clasificación y cosmovisiones. En el caso particular de la astronomía, cabe el peligro de caer en un argumento circular, dado lo sencillo de relacionar algunas observaciones astronómicas con supuestas «alineaciones» arquitectónicas. Este riesgo es especialmente alto en el caso de las alineaciones estelares, debido al gran número de estrellas y geometrías identificables en el cielo nocturno.

Resulta, por el contrario, mucho más fiable postular una relación entre la observación del movimiento del sol a lo largo del año y el propósito de regular eventos estacionales, como las fiestas religiosas, o de mantener un calendario estacional. La configuración espacial de las estructuras de Chankillo exhibe un patrón muy claro. En primer lugar, el sitio presenta por lo menos dos puntos de observación; el situado al oeste no parece dejar mucho lugar al equívoco, puesto que se encuentra definido por una estructura sin otro propósito aparente. Pero, además, la hilera de torres comprende con precisión los arcos de salida y puesta de sol según se ven desde ambos puntos de observación. Es decir, no estamos «seleccionando» blancos astronómicos entre innumerables posibilidades. Las cuatro salidas y pues-



Armamento: Representación de la figura de cerámica de un guerrero de Chankillo y elementos para el combate.

tas solsticiales (eventos astronómicos de reconocida importancia en numerosas culturas) quedan reflejadas de manera muy destacada en la arquitectura de las torres. Y estas, por sí mismas, aparecen como precursores distantes de las torres de observación solar registradas después entre los incas.

¿Qué nos permite concluir este descubrimiento acerca de la sociedad que construyó y ocupó Chankillo? Todo indica que en las plazas y edificios adyacentes a las Trece Torres tenían lugar rituales públicos y banquetes relacionados con la observación e interpretación de los movimientos del sol, en los que participaban grandes grupos de personas. Por el contrario, el acceso a los puntos de observación habría quedado restringido a unos pocos individuos, cuyo estatus les facultaba para acceder a los observatorios y conducir las ceremonias. Estos habrían gozado del poder para regular el tiempo, la ideología y los rituales calendáricos de los que participaba la sociedad. Tales roles abrirían el camino a la centralización del poder.

En las excavaciones se han recuperado guerreros de cerámica provistos no solo de armamento especializado, sino también de escudos y otras formas de protección corporal. Las figuras también exhiben indicadores de estatus, como tocados elaborados, variedad de camisas y ornamentos de cuello, torso y nariz, los cuales cumplen una función tanto decorativa como defensiva. La representación artística de los guerreros indica una preocupación por su integridad física; los símbolos de su alto rango reflejan el posible ascenso social de una clase de líderes guerreros, así como una centralización del poder en las manos de unos pocos. Por tanto, parece posible que, en Chankillo, el culto solar y las creencias cosmológicas hayan servido para legitimar la autoridad de una élite guerrera, del mismo modo que ocurriría casi dos milenios después en la sociedad inca. Por tanto, el papel de las Trece Torres no se habría reducido al de erigirse como expresión monumental de un conocimiento astronómico muy antiguo: habrían servido para regular el calendario ceremonial y sostener a una jerarquía social establecida.

Existen cada vez más pruebas de que el culto solar, el oficial en el Estado inca, contó con precursores, como parecen demostrar las ceremonias registradas en la isla del Sol, en el lago Titicaca. Dada la similitud entre el observatorio solar de Chankillo y los Pilares del Sol documentados en el Cuzco casi 2000 años después, parece muy probable que tales prácticas fuesen comunes entre las grandes civilizaciones andinas.

PARA SABER MÁS

El sistema de ceques del Cuzco: La organización social de la capital de los incas. R. T. Zuidema. Ed. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 1995.

Astronomy and empire in the ancient Andes: The cultural origins of Inca sky watching. B. S. Bauer y D. S. P. Dearborn. University of Texas Press, Austin, 1995.

Hacia una comprensión conceptual de la guerra andina. J. R. Topic y T. L. Topic en *Arqueología, antropología e historia en los Andes: Homenaje a María Rostworowski*, págs. 567-590. Dirigido por R. Varón Gabai y J. Flores Espinoza. *Historia Andina*, vol. 21. Instituto de Estudios Peruanos, Lima, 1997.

Religious warfare at Chankillo. Iván Ghezzi en *Andean Archaeology* III, págs. 67-84. Dirigido por W. Isbell y H. Silverman. Springer, 2006.

Chankillo: A 2300-year-old solar observatory in coastal Peru. Iván Ghezzi y Clive Ruggles en *Science*, vol. 315, págs. 1239-1243, 2 de marzo de 2007.

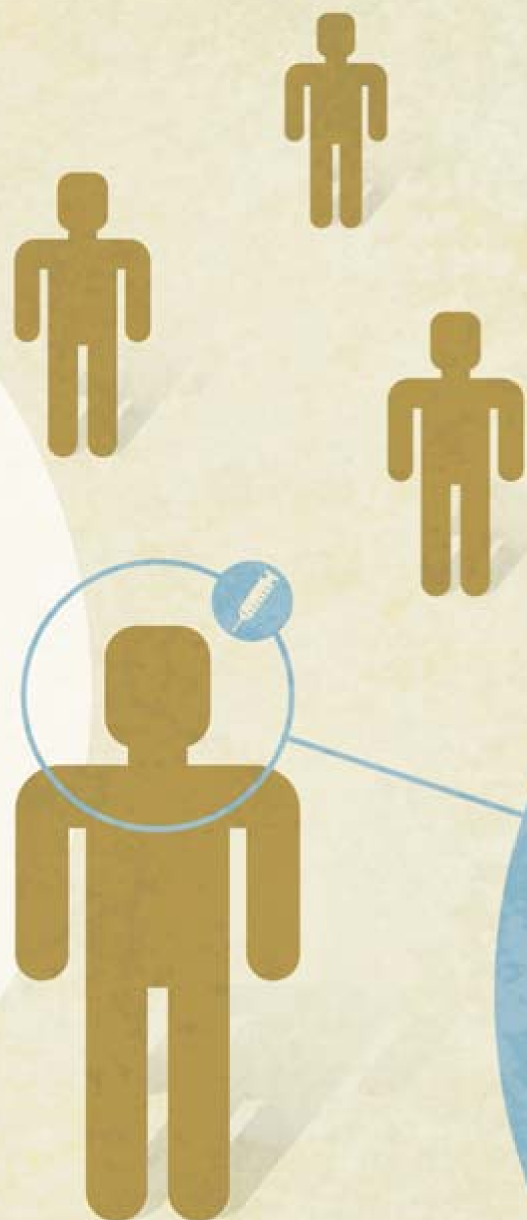

El nuevo número de la colección TEMAS
A LA VENTA
Lavoisier
La revolución química
También puede adquirirlo en
www.investigacionyciencia.es
INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

MEDICINA

Agilizar la creación de vacunas

La biología de sistemas propone un nuevo enfoque farmacológico, basado en un análisis profundo de la respuesta inmunitaria, que podría acelerar el diseño de vacunas

Alan Aderem



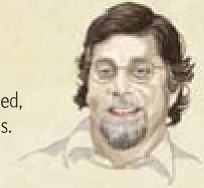
En 2007, los investigadores del sida se sintieron desolados cuando una prometedora vacuna contra el VIH no consiguió proteger a ninguno de los 3000 participantes de un ensayo clínico. Peor aún, la inoculación experimental, financiada por la compañía farmacéutica Merck y el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas, incrementó en algunas personas la probabilidad de contraer la enfermedad. Se habían invertido millones de dólares y dedicado más de un decenio de esfuerzos en la creación de la vacuna. Mientras tanto, en esos diez años fallecieron 18 millones de personas a causa de sida y varios millones más resultaron infectadas.

La vacuna de Merck fracasó en gran parte porque todavía se desconoce la manera de crear una vacuna eficaz. Varias vacunas han demostrado un éxito espectacular, como la de la poliomielitis o la viruela. Pero el azar desempeñó un importante papel en esos logros. A partir de un conocimiento limitado del sistema inmunitario y de la biología de un patógeno, se habían realizado estimaciones razonables sobre las formulaciones de la vacuna que podrían funcionar; a continuación, quizá después de algunos ajustes y gracias a un golpe de suerte, se comprobó el efecto protector de la vacuna en las personas. Pero a menudo la falta de un conocimiento profundo sobre la respuesta inmunitaria lleva a la decepción, al verificarse la ineficacia de una vacuna después de haber llevado a cabo un gran ensayo clínico con seres humanos.

¿Y si se dispusiera de una forma más rápida y satisfactoria para desarrollar y evaluar posibles vacunas? De modo ideal, el nuevo método debería incluir el conocimiento preciso de las respuestas inmunitarias necesarias para que la vacuna ofreciese una fuerte protección. ¿Qué poblaciones de células inmunitarias deben interaccionar entre sí y de qué manera? ¿Qué conjuntos de genes se tienen que activar o desactivar en esas células? Esa información podría integrarse en un perfil o seña de identidad acerca de la inmunidad protectora, que a continuación se em-

JUDE BUFFUM

Alan Aderem, inmunólogo y biólogo celular, fue cofundador del Instituto de Biología de Sistemas de Seattle en 2000. En la actualidad dirige Seattle BioMed, un instituto que se centra en el desarrollo de vacunas.



EN SÍNTESIS

Los métodos tradicionales para el diseño de vacunas dependen en gran medida del ensayo y error. Los investigadores desarrollan un compuesto que piensan que provocará una respuesta inmunitaria y, a continuación, lo prueban en miles de personas.

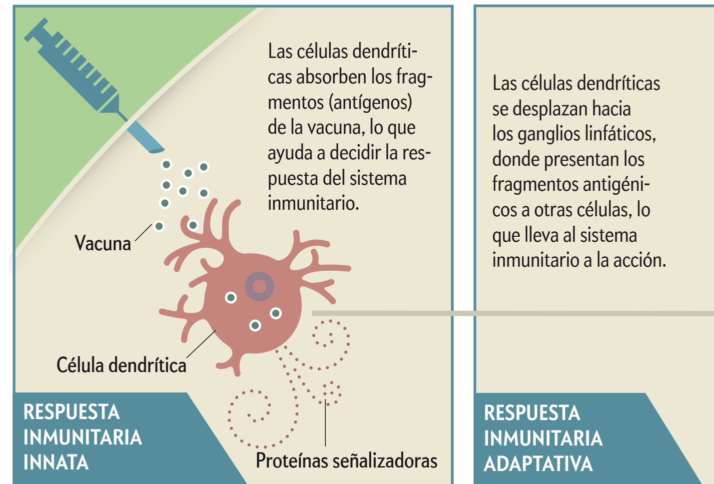
La biología de sistemas, un campo científico emergente, podría agilizar el desarrollo y los ensayos con vacunas.

Los científicos miden los cambios en la actividad genética, en los niveles de proteínas y en el comportamiento celular del sistema inmunitario en respuesta a una posible vacuna. Potentes ordenadores analizan los datos resultantes para elaborar los perfiles moleculares de esa respuesta.

Tras la comparación de esos perfiles con el perfil ideal de una respuesta inmunitaria totalmente protectora, los investigadores pueden centrarse enseguida en las fórmulas de vacunas más prometedoras y mejorarlas.

Defensa en profundidad

Una vacuna eficaz debe entrenar al sistema inmunitario para que despliegue una vigorosa defensa contra un virus, bacteria u otro patógeno antes de que suceda la infección verdadera. Las mejores preparaciones de vacunas (como los virus enteros o inactivados, o fragmentos de virus) provocan múltiples reacciones secuenciales en las dos partes de que consta el sistema inmunitario: el sistema innato y el sistema adaptativo. Este diagrama pone de relieve las principales etapas del complejo mecanismo de preparación del campo de batalla. Las células dendríticas, la primera línea de defensa del organismo, reaccionan poco después de la inoculación. Engullen la vacuna y, a continuación, trasladan la responsabilidad de la misión a las especialistas (las células T y las células B productoras de anticuerpos) para que se acuerden del invasor e insten al organismo a repeler futuros ataques de enemigos microbianos iguales o parecidos.



plearía de guía para determinar la acción necesaria de una vacuna para prevenir una enfermedad. Se compararían cientos de fórmulas y se investigarían solo aquellas que dieran lugar a un perfil inmunológico próximo al idóneo. Más tarde se mejorarían esas fórmulas mediante pequeños y rápidos ensayos clínicos con humanos hasta obtener un puñado de vacunas que generasen una seña de identidad biológica lo más cercana posible a la respuesta óptima. Tras identificar el perfil ideal, se podría conocer en un período de tiempo muy corto la posible eficacia de una vacuna. Para cuando llegase el momento de analizar la vacuna experimental definitiva en grandes ensayos clínicos con humanos, el éxito estaría prácticamente garantizado.

Hasta hace poco, los científicos carecían de las herramientas o de la pericia que les permitiera adoptar ese enfoque. Se necesitaban equipos interdisciplinares de especialistas en inmunología y microbiología, además de expertos que elaborasen modelos de sistemas biológicos complejos y extrajesen patrones a partir de un enorme volumen de datos. Y hacían falta técnicas para realizar medidas simultáneas y repetidas de la actividad génica, de los niveles de proteínas, del comportamiento celular y de otras características de la respuesta inmunitaria, sin olvidar los ordenadores y los programas informáticos con capacidad para procesar todos los datos.

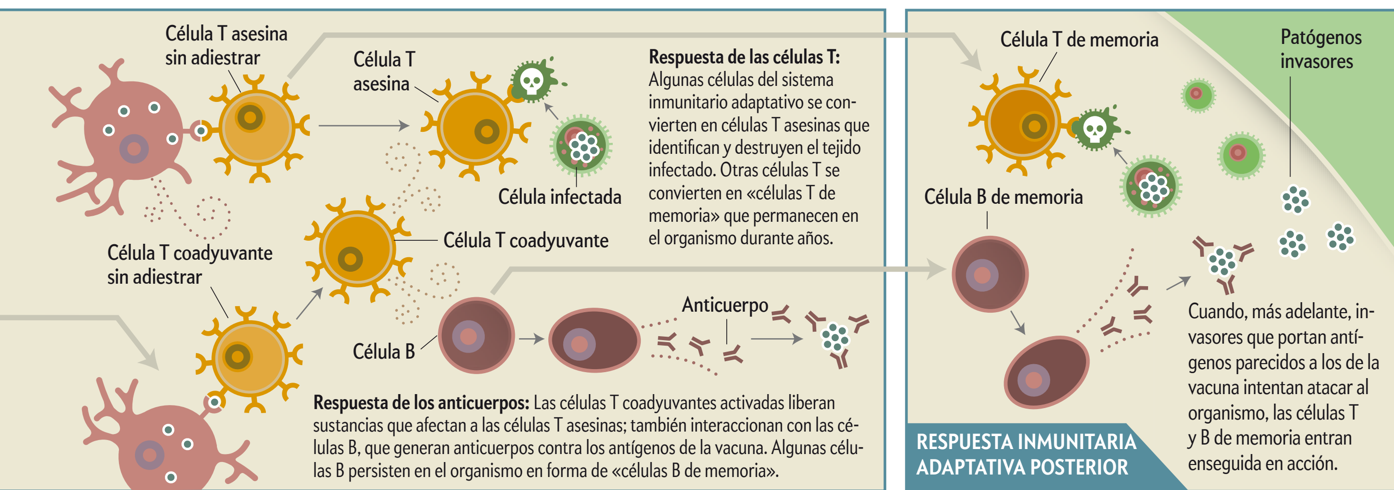
Hoy en día, sin embargo, varios investigadores especializados en biología de sistemas han formado ese tipo de equipos y han dado los primeros pasos hacia el desarrollo de herramientas que mejorarían la creación de vacunas. Estamos empezando a descifrar con cierto detalle las respuestas inmunitarias necesarias para proteger a una persona contra el VIH. En la actualidad se están utilizando las estrategias basadas en biología de sistemas para obtener vacunas contra el sida, la tuberculosis, la malaria y la gripe.

PRUEBAS PRELIMINARES

Todas las vacunas, las formuladas según el método clásico y las basadas en la biología de sistemas, contienen fragmentos de virus, bacterias o parásitos que desencadenan respuestas inmunitarias muy específicas. Algunas veces, estos fragmentos, denominados antígenos, forman parte de un virus que se halla debilitado (como en la vacuna de la viruela descubierta por Edward Jenner). Otras veces proceden de un agente infeccioso que presenta una forma inactivada (la versión Salk de la vacuna contra la poliomielitis) o puede que las propias partículas de antígeno funcionen a modo de vacuna (pensemos en las vacunas contra la difteria, la tos ferina o el tétanos). Las vacunas también incluyen adyuvantes, sustancias que potencian la actividad inmunitaria de forma más general. Cuando todo marcha bien, el sistema inmunitario responde a los antígenos de una vacuna a través de una cascada de sucesos moleculares y celulares muy bien orquestada que permite al organismo neutralizar futuras infecciones de cualquier virus o bacteria que porte antígenos iguales o parecidos. Para los creadores de vacunas, el truco consiste en dar con la mezcla correcta de material antigénico y de adyuvantes que genere la mayor protección.

A pesar de haberse desarrollado con métodos tradicionales, la vacuna contra la fiebre amarilla, o YF-17D, dio en el clavo. Representa una de las vacunas más eficaces jamás fabricada. Una única inyección proporciona inmunidad en una semana y la protección dura por lo menos 30 años. Ese éxito nos ofrecía una oportunidad para verificar algunas de las ideas y métodos de la biología de sistemas. Constituyó el detonante para iniciar nuestro estudio, liderado por Bali Pulendran, de la Universidad Emory, con la ayuda del equipo de Rafi Ahmed, del mismo centro y de nuestro grupo, del Instituto de Biología de Sistemas en Seattle. Pretendíamos identificar un perfil detallado de los cambios moleculares y celulares responsables del éxito de la vacuna en los individuos. Ya hemos identificado esa seña de identidad. Ahora nos basamos en esa información para desentrañar el motivo por el que las vacunas contra el VIH no han inducido la inmunidad necesaria para evitar la infección.

En nuestro experimento inicial sobre la fiebre amarilla vacunamos a 25 voluntarios sanos con YF-17D. A continuación, extrajimos muestras de sangre de los participantes en varias ocasiones: en el momento de la inyección y al cabo de 1, 3, 7 y 21 días. Cada muestra se colocó en un dispositivo de evaluación automático para determinar los genes que se iban activando. Por supuesto, los genes no sintetizan las proteínas que necesita una célula. En primer lugar, el ADN de los genes se transcribe en moléculas de ARN mensajero que, acto seguido, se utilizan como molde para fabricar las proteínas. Por tanto, al examinar los niveles de ARN podríamos conocer no solo los genes que se estaban expresando (los que se estaban empleando para sintetizar proteínas), sino también sus niveles de actividad.



Tal y como esperábamos, la inoculación de YF-17D activó en primer lugar el sistema inmunitario innato, la más antigua (desde un punto de vista evolutivo) de las dos partes que constituyen las defensas del organismo. Este sistema se encarga de lanzar un ataque inmediato contra cualquier patógeno. Las células inmunitarias innatas engullen y destruyen la mayoría de los microorganismos invasores. Aunque con frecuencia esa respuesta basta por sí sola para acabar con la amenaza externa, el sistema inmunitario innato da instrucciones al sistema inmunitario adaptativo, más reciente, para generar una reacción ajustada a las características del patógeno invasor. De tal forma, la próxima vez que se produzca una infección, el daño será limitado y se podrá contener con mayor rapidez.

Unos diez días después de la inoculación, las defensas innatas de nuestros voluntarios estimularon al sistema inmunitario adaptativo para que reaccionara mediante dos tipos de ataque consecutivos. En primer lugar generó anticuerpos, proteínas específicas dirigidas contra varias regiones del virus de la fiebre amarilla; a continuación, activó las células T asesinas, un grupo de células inmunitarias que reconocen y destruyen las células infectadas del organismo. Identificamos 65 genes que desempeñaban una función fundamental en la respuesta del organismo frente a la vacuna YF-17D. Un examen más minucioso demostró que cierto patrón de expresión de esos genes representaba un indicador fiable de la síntesis de potentes anticuerpos y de la activación de las células T. En otras palabras, habíamos verificado nuestra suposición. Podíamos determinar los genes del sistema inmunitario que se activaban o desactivaban durante el curso de una respuesta inmunitaria intensa provocada por la vacuna de la fiebre amarilla.

Lo gratificante de esos resultados es que la seña de identidad de la protección, que se origina por la respuesta inmunitaria del lugar de la vacunación, se puede medir en el torrente sanguíneo. Luego se podría desarrollar una sencilla prueba diagnóstica (con una gota de sangre obtenida mediante punción digital) para saber si una vacuna está funcionando. En los estudios de campo para una futura vacuna no se necesitaría una formación avanzada ni un equipo complejo para recoger y analizar datos, un aspecto importante a considerar si tenemos en cuenta que el VIH, la malaria y la tuberculosis golpean con más dureza en las regiones más pobres del mundo.

JUDE BUFFUM

HACER FRENTE AL VIH

Tras demostrar que la biología de sistemas proporcionaba una panorámica detallada de los efectos de una vacuna sobre el sistema inmunitario, nuestro equipo hizo frente al problema del VIH. La mejor forma de proceder habría consistido en comparar varias fórmulas de vacunas entre sí para ver si alguna de ellas inducía una respuesta inmunitaria ideal. Pero desconocíamos —y todavía hoy se ignoran— las características de una respuesta inmunitaria ideal frente al VIH, por lo que identificar esa seña de identidad representa uno de nuestros objetivos actuales. Hemos empezado por buscar indicios en los animales.

Las investigaciones han demostrado la posibilidad de infectar monos con el virus de la inmunodeficiencia de los simios (VIS), que comparte muchas similitudes con el VIH.

En colaboración con otros grupos, nuestro equipo del Instituto Seattle BioMed está ensayando en monos diversas vacunas basadas en el VIS. Se pretende conocer en profundidad el perfil inmunológico asociado a una fuerte respuesta inmunitaria contra el virus. Hasta la fecha, se han descrito varias características de la respuesta innata temprana que permiten predecir los animales vacunados que presentarán menos virus en la sangre tras su exposición posterior al VIS.

Si representamos la respuesta inmunitaria mediante un diagrama reticular, los genes cuya expresión determina una mayor capacidad para combatir el virus aparecen como nodos muy conectados. Los nodos representan genes individuales; las conexiones entre ellos, la influencia mutua de su actividad. Dado que los monos y las personas poseemos numerosos genes en común, el perfil de una respuesta óptima en los monos puede darnos una idea de cómo sería una seña de identidad humana en una respuesta intensa frente al VIH. También serviría para evaluar el funcionamiento de distintas vacunas en los humanos.

Algunos investigadores aplican enfoques sistémicos para descubrir el motivo por el que las vacunas fabricadas con versiones debilitadas del VIS resultan especialmente útiles a la hora de proteger a primates no humanos contra una infección posterior. Por desgracia, la utilización de un virus debilitado del VIH conlleva peligros. Con el paso del tiempo podría recombinarse con las versiones activas del virus y provocar en las personas la enfermedad que se quería evitar. El éxito de los estudios indicaría el camino a seguir para obtener una respuesta similar a la

UNA NUEVA FORMA DE DISEÑAR VACUNAS

El perfil del éxito

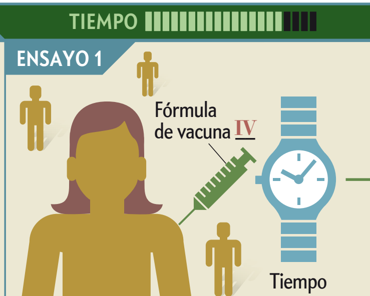
Con independencia de la estrategia que se utilice para desarrollar vacunas, se debe empezar una investigación básica sobre una serie de fórmulas experimentales. En el ejemplo ilustrado, solo una de las cuatro preparaciones supera las pruebas generales: induce la formación de anticuerpos y células T en el organismo y resulta segura en humanos.

PRUEBAS PRELIMINARES

Fórmula de vacuna I	Fórmula de vacuna II	Fórmula de vacuna III	Fórmula de vacuna IV
☐ Respuesta de anticuerpos	☐ Respuesta de anticuerpos	✓ Respuesta de anticuerpos	✓ Respuesta de anticuerpos
☐ Respuesta de células T	☐ Respuesta de células T	☐ Respuesta de células T	✓ Respuesta de células T
✓ Segura	✓ Segura	✓ Segura	✓ Segura

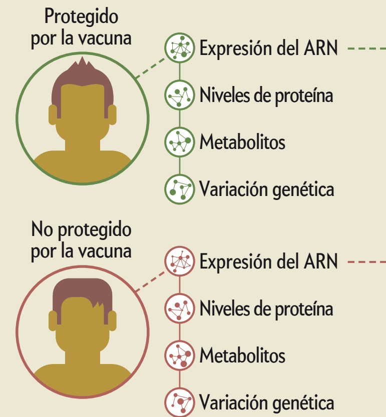
Enfoque tradicional TIEMPO

Como el sistema inmunitario tiene miles de modos de generar anticuerpos y células T (no todos eficaces), la fórmula de la vacuna que ha superado las pruebas preliminares debe ensayarse en numerosas personas. En este caso, los resultados del primer estudio clínico son decepcionantes; ensayos posteriores, que llevan más tiempo, revelan que la adición de dos adyuvantes desencadena la mejor protección.



Enfoque de la biología de sistemas TIEMPO

En primer lugar, se ensaya en unos pocos voluntarios la fórmula de la vacuna que ha superado las pruebas preliminares. Los equipos de análisis automático generan una seña de identidad específica a partir de la respuesta inmunitaria que desencadena la vacuna en los voluntarios: expresión del ARN (número de copias de moléculas de ARN que produce cada gen activado) y niveles de determinadas proteínas y metabolitos (productos de degradación), así como la variación genética. Los investigadores ensayan y ajustan repetidas veces la fórmula de la vacuna hasta que esta desencadena una seña de identidad que se correlaciona con un elevado nivel de protección.



que desencadenan los virus debilitados sin tener que asumir el riesgo de utilizarlos en una vacuna.

APRENDER DE LOS ERRORES

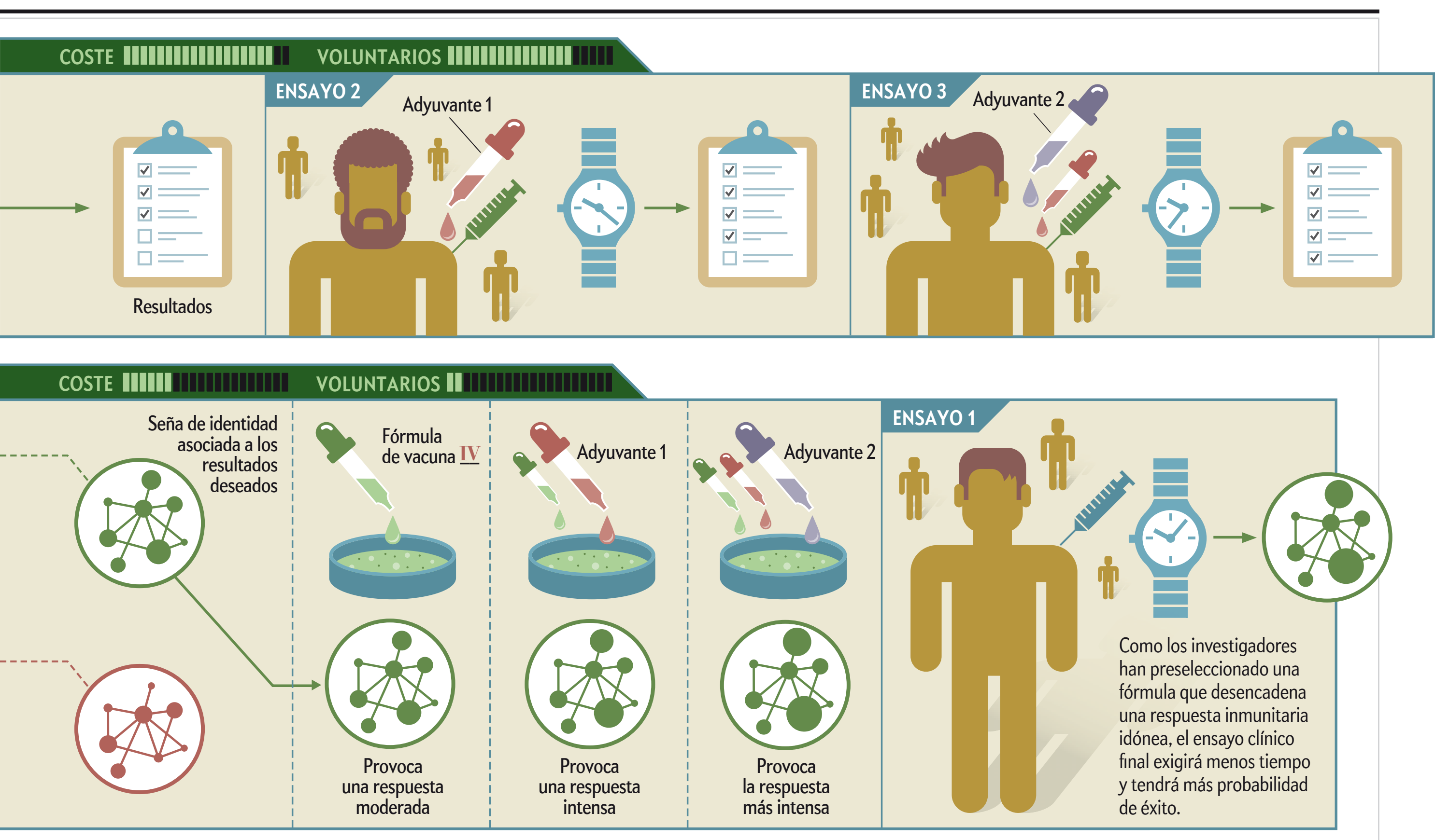
Distintos grupos han demostrado que una estrategia basada en la biología de sistemas puede funcionar en múltiples etapas del desarrollo de una vacuna. Nuestro equipo ha generado la seña de identidad inmunitaria de una vacuna totalmente protectora (YF-17D). Hemos determinado los perfiles inmunitarios de monos vacunados con éxito. Pero todavía hay algunos enigmas por resolver antes de crear una vacuna eficaz contra el VIH: ¿por qué falló la vacuna de Merck de 2007, un fracaso que sacudió a la comunidad de expertos en sida y acabó con las esperanzas depositadas en un tratamiento muy prometedor?

La vacuna de Merck (MRKAd5/HIV-1) no era la primera con la que se experimentaba. Los ensayos clínicos anteriores se habían centrado en desencadenar una respuesta inmunitaria que eliminara todas las partículas de VIH antes de que llegaran a asentarse en el organismo. Por desgracia, dos de las tres principales estrategias para la generación de esa clase de vacunas no se podían aplicar. El empleo de una versión debilitada del VIH resultaba demasiado peligroso y las partículas de VIH inactivadas no generaban el tipo de anticuerpos adecuado. Solo quedaba la utilización de fragmentos del VIH, bien como tales o bien unidos a otros virus (para impulsar la actividad inmunitaria). Pero hasta la fecha no se ha conseguido que este tipo de vacunas genere una respuesta de anticuerpos claramente eficaz.

El proyecto MRKAd5/HIV-1 adoptó un enfoque distinto. En lugar de inducir una intensa respuesta de anticuerpos, pretendía activar a las células T asesinas del sistema inmunitario adaptativo. Al igual que en ensayos anteriores, la vacuna de Merck utilizaba antígenos específicos del VIH unidos a un virus menos virulento (un adenovirus del tipo 5, bautizado con el nombre de Ad5) para evitar los problemas asociados a la introducción de partículas enteras de VIH. Los inmunólogos sabían que la estrategia, aunque tuviera éxito, no evitaría la infección de las células por el virus (para impedirlo debía haber también anticuerpos). Pero, por lo menos, mantendría la reproducción del virus bajo mínimos al destruir las células infectadas. En teoría, la vacuna permitiría que cualquier persona expuesta al VIH pudiera combatir al virus al mantenerlo a raya de forma indefinida.

La estrategia resultaba innovadora. El estudio representaría el primer ensayo a gran escala de una vacuna diseñada para activar células T que destruyeran células infectadas por el VIH. Los estudios preliminares en primates no humanos hacían albergar esperanzas de que la vacuna proporcionaría algún grado de protección a las personas.

De modo sorprendente, la vacuna de Merck no funcionó. A pesar de inducir una respuesta precisa de las células T contra las células infectadas por el VIH en más del 75 por ciento de los sujetos estudiados (un resultado extraordinario), un análisis provisional de los datos demostró que las tasas de infección por VIH y la carga viral no diferían entre el grupo vacunado y el grupo inoculado con placebo. Y lo que resultaba aún más asombroso, los participantes que presentaban anticuerpos contra Ad5 (debido a una exposición anterior a otro adenovirus de tipo 5) y que recibieron la vacuna parecían más propensos a la infección que los miembros del grupo inoculados con un placebo.



Nos unimos a Julie McElrath, del Centro Fred Hutchinson para la Investigación del Cáncer en Seattle, para analizar la vacuna de Merck. Juntos determinamos que la exposición a la vacuna MRKAd5/HIV-1 activaba miles de genes en las 24 horas siguientes a la inoculación. Esa respuesta concordaba con una activación extraordinaria de las células T. Además, descubrimos que entre esos genes figuraban los principales protagonistas del sistema inmunitario innato, según lo esperado. Pero cuando analizamos las muestras de sangre de las personas estudiadas que ya contaban antes con anticuerpos contra Ad5 (el mismo grupo que había experimentado una mayor frecuencia de infección por VIH en el ensayo clínico de la vacuna) observamos que la reacción del sistema inmunitario innato se hallaba gravemente debilitada.

Probablemente, ese debilitamiento crítico (que fue del todo inesperado) hizo que los participantes del ensayo se volvieran más vulnerables a una infección posterior, cuando mantenían relaciones sexuales o compartían jeringuillas con personas VIH-positivas. En la actualidad estamos llevando a cabo más estudios para confirmar esta hipótesis y explicar por qué la intensa respuesta de las células T no aportó ninguna protección a esos sujetos.

LOS PASOS SIGUIENTES

De momento, el enfoque sistémico parece el más adecuado para evaluar las vacunas experimentales después de haber sido formuladas. Sin embargo, el objetivo último consiste en diseñar vacunas de modo que, de principio a fin del proceso, se sepa antes si desencadenarán las respuestas inmunitarias deseadas.

Ya se han realizado avances significativos. Se ha descrito el efecto de determinados adyuvantes en el sistema inmunitario. Nuestro equipo ha examinado las redes de genes que se activan por medio de una amplia gama de adyuvantes. Se ha comprobado que algunos de los adyuvantes activan genes que tienden a estimular la acción de las células T, mientras que otras redes orientan la respuesta hacia la producción de anticuerpos. Si se combina el conocimiento detallado de los adyuvantes con las señas de identidad moleculares asociadas a una respuesta inmunitaria óptima, no se tardará en perfeccionar la producción de vacunas contra ciertos patógenos.

En cualquier caso, nuestro grupo está convencido de que una estrategia sistémica ofrece las mayores esperanzas para un diseño de vacunas más premeditado y predecible. Solo el conocimiento profundo del sistema inmunitario nos permitirá crear vacunas eficaces contra plagas como el sida, la malaria y la tuberculosis. Hasta ahora, los patógenos responsables de esas epidemias han conseguido desbaratar nuestros esfuerzos por desarrollar vacunas por métodos tradicionales. No podemos permitir que otra generación de decenas de millones de personas fallezca a causa de esas enfermedades globales.

JUDE BUFFUM

PARA SABER MÁS

The failed HIV Merck vaccine study: a step back or a launching point for future vaccine development? Rafick-Pierre Sekaly en *Journal of Experimental Medicine*, vol. 205, n.º 1, págs. 7-12, 21 de enero de 2008. **jem.rupress.org/content/205/1/7.full**

Alan Aderem: from molecules to megabytes. Nicole LeBrasseur, *ibid*, págs. 4-5.

Systems biology approach predicts immunogenicity of the yellow fever vaccine in humans. Troy D. Querec y col. en *Nature Immunology*, vol. 10, n.º 1, págs. 116-125, enero de 2009. Publicado en Internet el 23 de noviembre de 2008. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19029902**

Maestros



del disfraz

El mimetismo animal adopta numerosas formas, entre ellas las variedades química y acústica, y ofrece perspectivas únicas de la evolución

Peter Forbes

Corría el año 1848 cuando el joven naturalista inglés Henry Walter Bates viajaba a la Amazonía para buscar pruebas sobre el origen de las especies. A lo largo de su exploración, advirtió que los parientes locales de la mariposa de la col, una mariposa europea de la familia de los Piéridos, estaban acicalados con los vistosos colores rojos y amarillos de una familia de mariposas de la pluviselva, los Helicónidos. Al parecer, los helicónidos poseían toxinas que les conferían un sabor desagradable para los depredadores; Bates razonó que, al imitar los colores advertidores de los helicónidos tóxicos, los piéridos, inocuos, se libraban de la depredación. Cuando Bates volvió a Inglaterra en 1859, el año en que Darwin publicó *El origen de las especies*, el descubrimiento de esos «burladores», como los llamó, se convirtió en la primera prueba independiente que corroboraba la teoría darwinista de la evolución mediante selección natural. Según esta, los organismos más capaces de enfrentarse a los retos de su ambiente sobreviven para producir más

MIMETISMO CONDUCTUAL

Cambiar la forma

Thaumoctopus mimicus, el pulpo imitador, de Indonesia (*izquierda*), se hace pasar por un lenguado (*abajo*): mantiene los tentáculos unidos para simular la forma del pez plano y los hace ondular para reproducir su forma de nadar.



MICHAEL AW (*pulpo*); NORBERT WU, *CORBIS* (*pulpo camuflado*)

descendientes, de modo que sus caracteres se hacen cada vez más frecuentes en las siguientes generaciones.

La mayoría de los biólogos tardaron en reconocer la importancia de la imitación en la naturaleza. Pero hoy, siglo y medio después, el mimetismo se ha convertido en poco tiempo en un sistema modelo para estudiar la evolución. Sirve a la perfección a esa tarea porque tanto la presión de selección (la depredación) como los rasgos sometidos a selección son claros. En realidad, el mimetismo demuestra el proceso evolutivo en su forma más descarnada. El descubrimiento de otros tipos de mimetismo (químico, acústico e incluso conductual) ha generado asimismo un nuevo interés hacia el fenómeno. Y, de modo sorprendente, los análisis genéticos de un grupo de mimetas han revelado un mecanismo por el que pueden surgir nuevas especies.

MÁS ALLÁ DEL MIMETISMO VISUAL

En un principio se consideró que el mimetismo constituía una estrategia exclusivamente visual, del tipo evidente de las coloreadas mariposas amazónicas de Bates. Pero para los insectos, la comunicación química suele ser más importante que la visual, y muchos depredadores escuchan furtivamente esas conversaciones químicas para su propio beneficio. La gran mariposa hormiguera de lunares (*Maculinea arion*), que habita en el norte de Europa y Asia, representa un ejemplo notable. En el siglo XX, la especie sufrió reducciones espectaculares en numerosas zonas, y en 1979 se extinguió en Gran Bretaña, a pesar de los intentos por salvarla. Justo aquel año, Jeremy Thomas, de la Universidad de Oxford, empezó a comprender el motivo de la inutilidad de los esfuerzos de conservación: la supervivencia de la hormiguera de lunares dependía de una especie de hormiga a la que imitaba.

En Inglaterra, las orugas de hormiguera de lunares comienzan su vida alimentándose de las plantas de tomillo que crecen en las laderas calizas y cálidas, cuyo pasto ha sido recortado por ovejas, conejos y otros herbívoros. Cuando las orugas mudan por tercera vez, se dejan caer al suelo desde las plantas de tomillo e inician allí su falsa campaña de publicidad. Las orugas emiten una señal química que atrae a las hormigas locales y las engaña, haciéndoles creer que pertenecen a su propia especie. Las hormigas burladas transportan a las orugas hasta su hormiguero subterráneo, donde estas se dedican a comer las larvas de las hormigas durante los diez meses siguientes, tras lo cual inician la metamorfosis y emergen del suelo como mariposas.

Aunque hay varias especies de hormigas que transportan a las orugas a sus hormigueros, las orugas solo prosperan en los nidos de *Myrmica sabuleti*, una especie de hormiga roja. Y esta solo medra cuando la hierba de las laderas calizas es corta, lo que permite la llegada de luz solar que le proporciona calor. Thomas supuso que cuando el pastoreo se reducía, la hierba crecía demasiado para que pudieran vivir las hormigas *M. sabuleti*. Cuando estas desaparecieron, también lo hizo la hormiguera de lunares.

Gracias a la revelación de Thomas, en los años ochenta se logró reintroducir la mariposa en Inglaterra, y se ayudó a que esta y las hormigas prosperaran mediante una cuidadosa gestión del pasto. Pero quedaba una incógnita por resolver: las hormigas no solo toleran a las orugas que transportan hasta su hogar, sino que además las tratan a cuerpo de rey; matan incluso a sus propias larvas y se las dan de comer a las orugas si el alimento escasea. En 2009, Thomas determinó el motivo de ese comportamiento. Además de copiar la señal química de la hormiga, las orugas duplican una señal acústica. En concreto, la oruga reproduce un débil sonido característico de la hormiga reina, estrategia que le asegura un suministro de comida continuo. Gracias a esas dos imitaciones esenciales, la hormiguera de lunares engaña a las hormigas para que la vean no solo como a uno de los suyos, sino como al miembro más importante de su sociedad.

El mimetismo acústico se observa, asimismo, en uno de los enfrentamientos clásicos de la naturaleza: la pugna entre polillas y murciélagos. Los murciélagos cazan de noche mediante ecolocación: emiten chasquidos de ultrasonidos y detectan los ecos de estos sonidos cuando rebotan en objetos del entorno. Como resultado obtienen una imagen auditiva de sus inmediaciones, que incluye las sabrosas mariposas nocturnas que pueda haber en la proximidad. La táctica resulta tan eficiente que las polillas se han visto obligadas a desarrollar contramedidas para sobrevivir.

Igual que otras mariposas diurnas, algunas polillas nocturnas obtienen sustancias químicas tóxicas de las plantas que las hacen ponzoñosas para los murciélagos. Pero mientras que un insecto diurno informa de su toxicidad con una coloración advertidora, esa estrategia no funcionará en una polilla nocturna que intente evitar a un depredador que caza en la oscuridad. Las mariposas gitanas (*Arctia caja*) han desarrollado soluciones ingeniosas para superar ese inconveniente: emiten chasquidos que los murciélagos aprenden a asociar con presas desagradables. No todas las especies de mariposas gitanas (de la familia Arctíidos) son realmente tóxicas. Pero, según los experimentos de William Conner, de la Universidad de Wake Forest, una vez un murciélago come una mariposa gitana tóxica, tenderá en lo sucesivo a evitar a otras polillas que emiten sonidos, incluidas las comestibles.

Las polillas poseen todavía otro truco acústico. En 2009, el grupo de Conner informó en *Science* que los chasquidos más finamente sintonizados de la polilla comestible *Bertholdia trigona* desorganizan el mecanismo de ecolocación de los murciélagos: estos intentan capturar a las polillas pero no lo consiguen. Se trata de una verdadera interferencia de radar, comparable a la de los modernos aviones de combate.

Además de embaucar a los depredadores mediante la coloración, el olor o el sonido, los mimetas intentan estafar al enemigo adoptando el aspecto de otra especie. En 1998 se descubrió en Indonesia un pequeño pulpo, *Thaumoctopus mimicus*, con todo un arsenal de disfraces. Como la mayoría de los pulpos (y

EN SÍNTESIS

El mimetismo en las mariposas amazónicas supuso la primera prueba independiente de la teoría de la evolución mediante selección natural, de Charles Darwin.

En tiempo reciente, los biólogos se han interesado de nuevo por los artistas estafadores de la naturaleza, no solo por el descubrimiento de nuevos mimetismos, sino también porque el fenómeno proporciona un sistema ideal para estudiar la evolución.

Los estudios de genes y del comportamiento de un grupo de mimetas han revelado, en efecto, un mecanismo que favorece la aparición de nuevas especies.



Peter Forbes es escritor científico, con especial interés en la relación entre el arte y la ciencia. Químico de formación, ha colaborado con distintas revistas, entre ellas *Scientific American* y *New Scientist*.



Las mariposas mutantes de la especie *Heliconius cydno*, con coloración de alas amarilla en lugar de blanca, se aparean con preferencia con mariposas de su mismo color porque el gen para el color de las alas se halla ligado al gen para la elección de pareja. En Costa Rica, la forma amarilla ha evolucionado y ha dado lugar a una especie distinta, *H. pachinus*.

sus parientes, los calamares y las jibias), la especie indonesia cambiaba de color para confundirse con su entorno. Pero, además, copiaba a una serie de animales marinos que medran en las mismas aguas que el pulpo, como el pez león, la serpiente marina listada y el lenguado; no solo remedaba la coloración de dichos animales, sino que también modificaba su comportamiento para imitar su forma.

PRUEBAS PARA LA EVOLUCIÓN

En su mayor parte, la investigación del mimetismo se ha centrado en la señal mimética y en la manera en que esta se recibe. Pero hay un grupo de animales, las mariposas *Heliconius* que cautivaron a Bates, de los que ahora poseemos un conocimiento más completo. Se han identificado en ellas las características genéticas responsables de su asombroso conjunto de patrones miméticos. Gracias a esta nueva información, se ha realizado un descubrimiento que habría hecho las delicias de Darwin: un mecanismo para el principio mismo de la especiación, el proceso por el que una población de una especie queda aislada reproductivamente (es decir, deja de reproducirse con otras poblaciones) y da origen a una nueva especie.

Chris Jiggins, en la actualidad en la Universidad de Cambridge, determinó que, además del mimetismo, los patrones alares de *Heliconius* presentaban otra finalidad: los machos los utilizaban para escoger pareja. Jiggins, junto con Mauricio Linares, de la Universidad de los Andes, en Colombia, describió algunos ejemplos que ilustraban los efectos de la influencia recíproca entre el mimetismo y la elección de pareja. Mediante el cruzamiento de mariposas de la especie *Heliconius melpomene* con otras de *H. cydno*, Linares crió en tres generaciones un híbrido que exhibía el patrón alar de una *H. heurippa* salvaje. En experimentos de elección de pareja, este híbrido, que en un cierto sentido acababa de aparecer por evolución, prefirió al instante a los individuos con su propio patrón alar antes que los de las especies progenitoras, con patrones alares diferentes.

A finales de aquel año, Marcus Kronforst, de la Universidad de Harvard, demostró que el gen para el color de las alas en *Heliconius* se heredaba junto con el gen para la elección de pareja. Esta conexión explica la preferencia instantánea que las mariposas híbridas artificiales demostraban para sus dobles. La relación entre el color de las alas y la elección de pareja proporciona un mecanismo que favorece la especiación. En una población determinada de mariposas *Heliconius*, una mutación que produzca un patrón alar ventajoso se extenderá con rapidez, porque los mutantes preferirán aparearse con los de su propio tipo. A lo largo del tiempo, dos formas que podrían entrecruzarse pero que eligen no hacerlo acumularán otras variaciones genéticas que finalmente provocarán esterilidad en cualquier descendiente que nazca de su unión. Tras producirse un aislamiento reproductivo total, existirán dos especies allí donde había una (o, en el caso de las mariposas de Linares, existirán tres especies donde había dos).

Al estudiar dos poblaciones de *H. cydno* en Ecuador y Costa Rica, Kronforst ha identificado los dos extremos de este proceso de especiación. En Ecuador, las mariposas blancas y amarillas son dos variedades de la misma especie, *H. cydno*, separadas solo por diferencias en un gen que cambia el color de las alas de blanco a amarillo. Esas mariposas parecen hallarse en el primer estadio de especiación. En cambio, sus contrapartes en Costa Rica han divergido hasta el punto de que la forma amarilla constituye una especie separada, *H. pachinus*. Aunque en cautividad las dos especies costarricenses pueden hibridarse todavía, sus descendientes presentan pequeñas diferencias en el patrón alar que los hacen vulnerables a la depredación. Presumiblemente, las diferencias genéticas entre esas dos especies continuarán acumulándose con el tiempo, hasta que llegará un momento en que no podrán producir ningún descendiente viable.

En 1863, Bates profetizó que «algún día, el estudio de las mariposas, animales considerados ejemplos de ligereza y frivolidad, en lugar despreciarse, se valorará como una de las ramas más importantes de la biología». El trabajo del grupo de Jiggins y Kronforst ha convertido en realidad la predicción de Bates. No hay duda de que el estudio de otros mimetismos aportará nuevos descubrimientos sobre los mecanismos intrínsecos de la evolución.

CORTESÍA DE MARCUS KRONFORST, UNIVERSIDAD DE HARVARD

PARA SABER MÁS

Acoustic mimicry in a predator-prey interaction. Jesse R. Barber y William E. Conner en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 104, n.º 22, págs. 9331-9334, 29 de mayo de 2007.

Mimicry and foraging behaviour of two tropical sand-flat octopus species off North Sulawesi, Indonesia. Roger T. Hanlon et al. en *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 93, n.º 1, págs. 23-38, enero de 2008.

Polymorphic butterfly reveals the missing link in ecological speciation. Nicola L. Chamberlain et al. en *Science*, vol. 326, págs. 847-850, 6 de noviembre de 2009.

Dazzled and deceived: mimicry and camouflage. Peter Forbes. Yale University Press, 2009.

John J. Shea es profesor de antropología en la Universidad de Stony Brook e investigador en el Instituto del Lago Turkana en Kenia. Tallador de sílex profesional, su trabajo aparece en numerosos documentales y se exhibe en la Institución Smithsoniana y el Museo Americano de Historia Natural.



EVOLUCIÓN

El mito sobre nuestro origen

Homo sapiens no evolucionó en dos etapas, primero para adquirir la apariencia física actual y luego el comportamiento moderno, sino en una sola

John J. Shea

Durante décadas, los arqueólogos han sostenido que el comportamiento moderno surgió en *Homo sapiens* decenas de miles de años después de que la especie evolucionase hasta adoptar su apariencia física actual. Los arqueólogos disentían sobre si el proceso fue gradual o repentino, pero suponían que el comportamiento de los primeros *Homo sapiens* difería en gran medida del nuestro. Habrían carecido de arte, símbolos y rituales, y no se habrían dedicado de manera sistemática a la pesca, el marisqueo u otras actividades. Tampoco habrían desarrollado técnicas complejas como las trampas, las redes, los proyectiles o la navegación.

Se pensaba que los primeros humanos anatómicamente modernos, a menudo denominados *Homo sapiens* arcaicos, vivieron en grupos pequeños y vulnerables, formados por individuos con fuertes vínculos de parentesco. Dotados de herramientas simples, habrían dependido de la caza de animales de gran tamaño y habrían sufrido los cambios ambientales con mayor severidad que los humanos modernos. En palabras de Thomas Hobbes, sus vidas eran «solitarias, horribles, crueles y cortas». Si necesita formarse una imagen de ellos, cierre los ojos y piense en el estereotipo del hombre de las cavernas. Sin embargo, las pruebas arqueológicas actuales apuntan a que algunas características que asociamos a los humanos modernos —en concreto, nuestra capacidad para mostrar un gran abanico de conductas— ya se daban en algunos grupos que vivieron en África hace largo tiempo. Cada vez es mejor acogida la idea de que el comportamiento «moderno» no apareció en un pasado reciente ni de manera drástica.

En 1984, Misia Landau propuso en el artículo «Human evolution as narrative» («La evolución humana como narrativa») publicado en *American Scientist*, que los relatos de tradición precientífica habrían influido durante largo tiempo en los investigadores. La idea de que *Homo sapiens* se transformó de un estado arcaico a otro moderno se debería, en parte, a dicha tradición. Pero, aunque esta permite construir una crónica satisfactoria, no proporciona un esquema realista para entender el complejo curso de la evolución humana. De hecho, la mayoría de los cambios evolutivos consisten en transformaciones menores cuyas consecuencias aumentan de manera gradual a lo largo de miles de generaciones.

Para comprender mejor nuestra prehistoria, encuentro más apropiado un enfoque centrado en la variabilidad del comportamiento. Esta característica, que podemos reconocer con facilidad en los humanos actuales, está empezando a manifestarse

EN SÍNTESIS

La tradición arqueológica europea dedujo que el comportamiento moderno habría surgido en *Homo sapiens* en algún momento durante el Paleolítico Superior.

Un análisis de las técnicas de tallado registradas en yacimientos de África oriental a lo largo de diferentes épocas demuestra que tal «revolución» jamás existió.

La variabilidad de comportamiento, la manera de adaptarse al entorno que caracteriza a nuestra especie, se halla documentada en diferentes lugares y épocas.



en el registro arqueológico de los primeros *Homo sapiens*. Los pobladores prehistóricos vivieron de formas diferentes en lugares y cronologías distintas. Debemos buscar y explicar tales desemejanzas, pues, en un marco evolutivo, solo las diferencias importan. Una manera interesante de dar cuenta de ellas consiste en interpretar la variabilidad del comportamiento durante la prehistoria como diferentes estrategias de adaptación. Pero, para ello, hemos de comenzar por rechazar un concepto incorrecto y anacrónico en lo que se refiere a la evolución humana: la creencia de que resulta posible distinguir entre *Homo sapiens* «arcaicos» y «modernos».

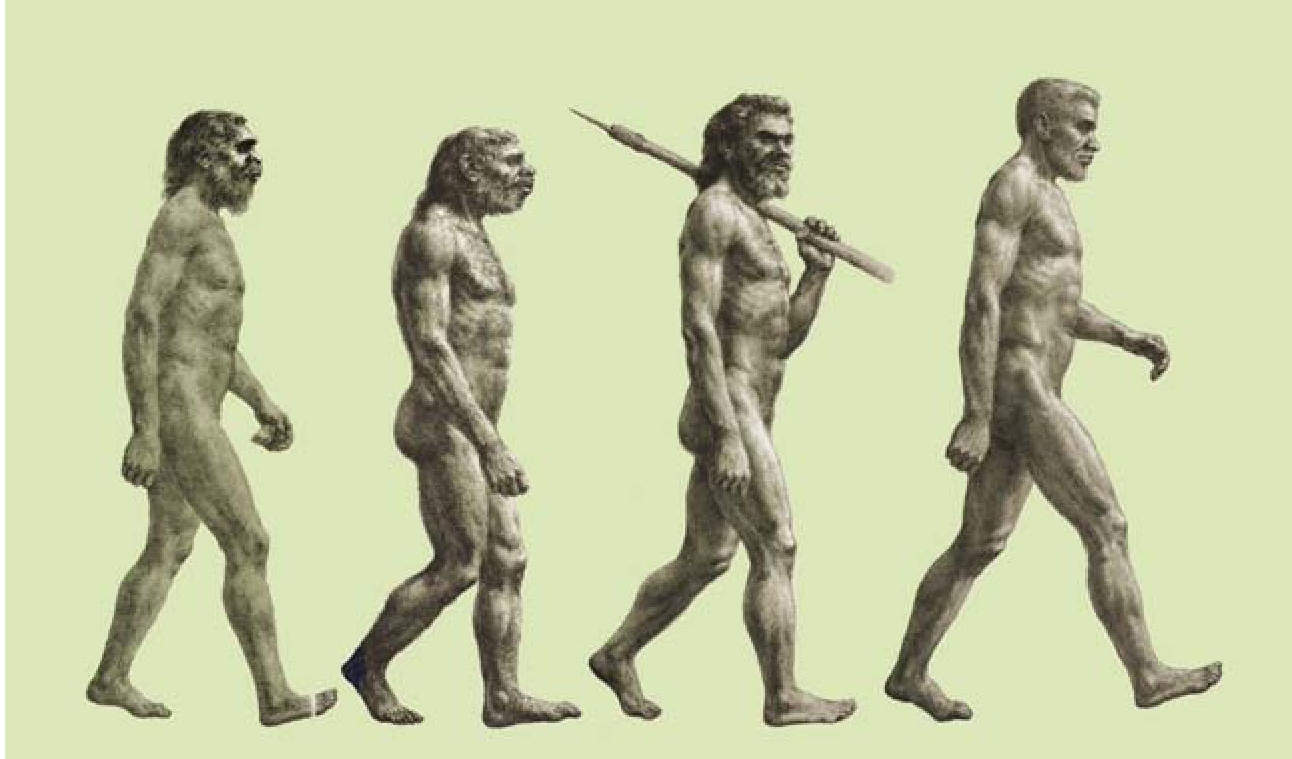
A partir de los fósiles hallados en Europa se llegó a la conclusión de que, en algún momento, *Homo sapiens* se transformó de un humano «arcaico» en uno «moderno», capaz de utilizar símbolos, realizar rituales y producir instrumentos mucho más elaborados. Descubrimientos recientes en África indican que el comportamiento moderno surgió mucho antes. En los yacimientos de Omo Kibbish (*fotografía*), en Etiopía, se han hallado fósiles de *Homo sapiens* y útiles líticos de 195.000 años de antigüedad.

CORTESÍA DEL AUTOR

EL NACIMIENTO DE UNA IDEA

La distinción entre humanos arcaicos y modernos se implantó a medida que la investigación arqueológica se extendía desde Europa hacia otros países. El estudio de la prehistoria nace en el Viejo Continente durante el siglo XIX en sociedades científicas, museos y universidades. Durante la década de 1920, los descubrimientos en numerosos yacimientos arqueológicos europeos generaron una opinión consensuada sobre el Paleolítico, hoy datado entre los 2,6 millones de años y los 12.000 años de antigüedad. Dicho período se dividió en tres fases, Paleolítico Inferior, Medio y Superior, las cuales se asociaron a la presencia de ciertos conjuntos líticos o «industrias», como los bifaces del Achelense (Paleolítico Inferior), los raspadores sobre lascas de Levallois del Musteriense (Medio), o las láminas y puntas esculpidas en asta del Auriñaciense (Superior). Que los instrumentos más recientes fuesen de menor tamaño, más ligeros y elaborados indicaba una complejidad técnica y cultural crecientes. En Europa, las industrias del Paleolítico Superior solo se hallaban asociadas a fósiles de *Homo sapiens*, mientras que las del Inferior y Medio se relacionaban con otros homínidos (*Homo heidelbergensis* y *Homo neanderthalensis*). Ello sustentó la idea de que se dieron grandes diferencias evolutivas entre un *Homo sapiens* moderno y otros homínidos más arcaicos.

En los yacimientos más antiguos del Paleolítico Superior europeo se han hallado indicios de producción de láminas, instrumentos óseos, proyectiles, hogares complejos, adornos corporales, arte, intercambios de larga distancia, rituales funerarios, arquitectura y conservación de alimentos, así como pruebas de caza mayor especializada, caza menor sistemática y explotación de recursos acuáticos. La variabilidad de tales conductas se mues-

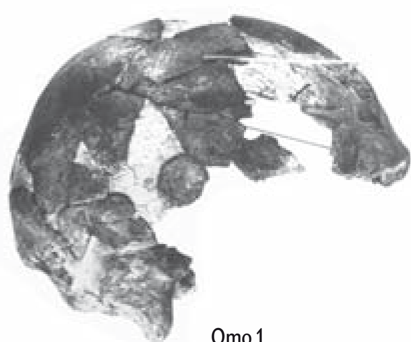


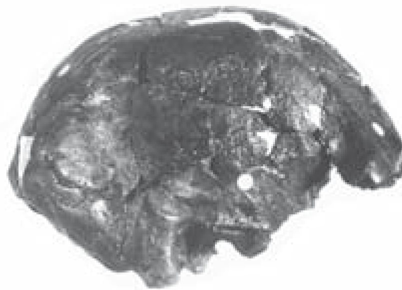
Representación popular de la evolución del hombre. Imágenes como esta sugieren que los humanos arcaicos se transformaron en modernos, en lugar de experimentar un incremento conjunto de la variabilidad morfológica y conductual.

tra mucho mayor durante el Paleolítico Superior que en períodos anteriores: al igual que los antropólogos documentan la variabilidad cultural entre los humanos actuales, los arqueólogos también pueden determinar si una punta de hueso o una cuenta de collar procede de un yacimiento en España, Francia o Alemania. No sorprende que la mayoría acepte que la arqueología del Paleolítico Superior es «nuestra propia arqueología».

Los instrumentos líticos del Paleolítico Inferior y Medio hallados en Europa y otras partes del mundo muestran solo un pequeño abanico de formas simples. En la actualidad, talladores con la preparación y motivación apropiadas fabrican esos útiles en minutos o incluso segundos. Las diferencias observadas entre los artefactos del Paleolítico Inferior y Medio solo obedecen al tipo de roca empleado y al grado de afilado de los útiles. Las distinciones cronológicas y geográficas en tales épocas solo se reflejan en la proporción relativa con la que se han hallado dichos instrumentos sencillos. En gran parte de Europa, África y Asia se ha observado casi la misma variedad entre los instrumentos de piedra procedentes del Paleolítico Inferior y Medio.

En Europa, las diferencias entre los registros del Paleolítico Superior y los del Inferior y Medio resultan tan acusadas que, desde el decenio de 1970, la transición ha llegado a denominarse «revolución del Paleolítico Superior». Este fenómeno regional se convirtió en global a finales de los ochenta, a raíz de un congreso en la Universidad de Cambridge titulado «La revolución humana». Dicha revolución fue descrita como un hito que distinguió a los humanos modernos de sus predecesores y otros homínidos, como *Homo neanderthalensis*. Se desató un gran debate sobre las causas de dicha transformación. Expertos como Richard Klein atribuyeron los cambios al polimorfismo del gen *FOXP2*, también llamado gen del lenguaje. Sin embargo, el polimorfismo de *FOXP2* se ha identificado también en el ADN de los neandertales. Numerosos investigadores, como Christopher Henshilwood, de la Universidad de Witwatersrand, Curtis Marean, de la Universidad estatal de Arizona, Paul Mellars, de la Universidad de Cambridge, April Nowell, de la Universidad de Victoria, y Phil Chase, de la Universidad de Pensilvania, defienden todavía que las capacidades simbólicas desempeñan un papel fundamental en el comportamiento moderno [*véase* «Cuando el mar salvó a la humanidad», por Curtis Marean; Investigación y Ciencia, octubre de 2010]. Sin embargo, como han argumentado João Zilhão, de la Universidad de Bristol, y Francesco d'Errico, de la Universidad de Burdeos, el hallazgo de pigmentos minerales, cuentas perforadas, enterramientos y toda





En las excavaciones de 1967 en la formación Kibish del valle del río Omo, en Etiopía, Richard Leakey descubrió dos cráneos de los primeros *Homo sapiens*: el cráneo Omo 1 presenta un hueso frontal elevado y un occipital redondeado, rasgos asociados a *Homo sapiens* más modernos; en cambio, Omo 2 exhibe ciertas características consideradas primitivas: un hueso frontal más bajo y un occipital más anguloso. Ambos datan de hace 195.000 años, lo que demuestra que la variabilidad puede encontrarse en el registro fósil más antiguo.

THE ZALLINGER FAMILY LLC (*ilustración*); CORTESÍA DE MICHAEL DAY (*cráneos*)

una variedad de artefactos en yacimientos asociados a neandertales desafía dicha hipótesis.

LA REVOLUCIÓN AUSENTE

Hace décadas que existen pruebas fósiles que contradicen la hipótesis de la revolución del Paleolítico Superior. Durante las décadas de 1920 y 1930, al tiempo que se conformaba el marco general que describiría el Paleolítico, algunos arqueólogos de la escuela europea comenzaron a buscar fósiles humanos y utensilios líticos en Oriente Próximo, África y Asia. Fuera de sus países de origen, arqueólogos coloniales como Dorothy Garrod y Louis Leakey esperaban que el registro europeo sirviera de modelo para la evolución humana, por lo que organizaron sus hallazgos según ese patrón. Muy pronto, observaron discrepancias entre la realidad y sus expectativas, ya que fuera de Europa se descubrieron fósiles de *Homo sapiens* asociados a industrias del Paleolítico Inferior y Medio. Los arqueólogos supusieron que los restos databan de períodos inmediatamente anteriores a la revolución del Paleolítico Superior. Pero, en realidad, tales hallazgos y otros posteriores ponen en duda la misma existencia de dicha revolución.

En Europa, el fósil de *Homo sapiens* más antiguo data de hace tan solo 35.000 años. Pero los estudios sobre la diversidad genética de los humanos actuales indican que nuestra especie surgió en África hace unos 200.000 años. En el valle inferior del río Omo y en tramo medio del Awash, en Etiopía, se han hallado restos de *Homo sapiens* con una antigüedad de entre 165.000 y 195.000 años. Existen pruebas claras de que los humanos salieron de África hacia Asia hace más de 40.000 años. En las cuevas de Skhul y Qafzeh, en Israel, se han hallado fósiles que comparten características con los humanos modernos y que poseen una antigüedad de entre 80.000 y 120.000 años. También en la cueva de Zhiren, en China, se han encontrado restos de *Homo sapiens* de hace 100.000 años. Existen pruebas de la presencia humana en Australia hace al menos 42.000 años. Y nada parecido a una revolución ha precedido a la aparición de *Homo sapiens* en ninguna de estas regiones del planeta. Además, todos estos fósiles de *Homo sapiens* se han hallado junto a industrias del Paleolítico Inferior o Medio.

Se dan algunas diferencias entre los esqueletos de estos primeros *Homo sapiens* y los fósiles europeos del Paleolítico Superior. Las mejor documentadas se refieren a la forma del cráneo. Pero, como afirma Daniel Lieberman, de la Universidad de Harvard, en su reciente obra *The evolution of human head* («La evolución del cráneo humano»), no estamos más que empezando a entender la base genética y conductual responsable de las variaciones morfológicas del cráneo. Y, dado que no comprendemos bien el origen de dichas variaciones, carece de todo sentido establecer grandes diferencias evolutivas entre humanos a partir de la morfología craneal. La mayoría de los restos combinan rasgos «primitivos» (o ancestrales) con otros «derivados» (de evolución más reciente). Por más que los antropólogos físicos dividan a los humanos prehistóricos en un grupo arcaico y otro moderno, es ilegítimo alegar dichas diferencias para explicar nada si desconocemos la manera en que esas características se relacionaban con el comportamiento.

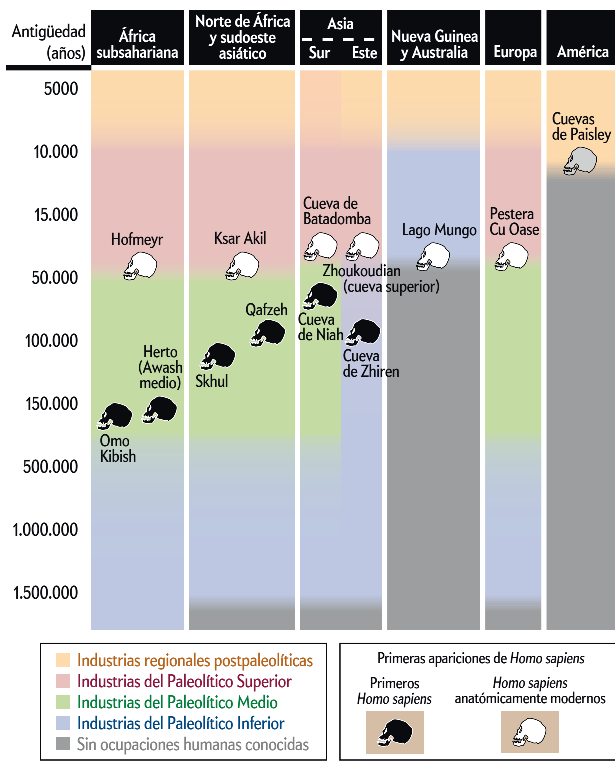
Los primeros fósiles de *Homo sapiens* en África y Asia se encuentran asociados a indicios muy precoces de comportamientos modernos similares a los registrados en el Paleolítico Superior europeo. Entre ellos se cuentan la pesca sistemática, la explotación de recursos marinos, la producción de proyectiles complejos, el uso de símbolos —como pigmentos minerales y conchas perforadas— e incluso enterramientos con ajuar funerario. Pero, como las investigadoras de la Universidad Hebrea de Jerusalén Erella Hovers y Anna Belfer-Cohen afirman en su libro *Transitions before the transition* («Transiciones antes de la Transición»), la conducta moderna durante el Paleolítico Medio se antoja intermitente. Hay indicios de tales comportamientos en algunos yacimientos o durante algunos miles de años, pero después desaparecen. Y, si se tratase de un rasgo derivado y fundamental en el curso de la evolución humana, no cabría esperar que desapareciese durante períodos prolongados.

En mi opinión, lo más sorprendente del debate sobre el momento en que *Homo sapiens* se volvió humano reside en que tan siquiera se ha verificado la hipótesis de trabajo: a saber, si existían diferencias de comportamiento entre los primeros representantes de nuestra especie y otros posteriores. Dado que la modernidad es una categoría tipológica, comprobar dicha hipótesis no se antoja tarea sencilla. No todos los grupos clasificados como modernos han dejado pruebas inequívocas de esa clase de comportamiento en todo contexto y época. Por ejemplo, la talla ocasional de cantos de río por parte de los huma-

***HOMO SAPIENS* EN EUROPA Y EL MUNDO**

Una revolución inexistente

La verdadera relación entre los fósiles de *Homo sapiens* y la industria lítica del Paleolítico resulta mucho más compleja que lo que indica el registro europeo. La aparición de humanos anatómicamente modernos asociados a la llamada «revolución» del Paleolítico Superior solo existió en Europa. En África y otras regiones, los esqueletos de *Homo sapiens* anatómicamente modernos han aparecido junto a útiles que datan del Paleolítico Medio e incluso del Inferior. Los cráneos en el diagrama indican fósiles humanos, excepto en los restos de las cuevas de Paisley, donde solo se hallaron coprolitos humanos.





Puntas líticas de unos 104.000 años de antigüedad halladas por el equipo del autor en el yacimiento etíope Omo Kibish. Elaboradas en jaspe o sílex, se han obtenido mediante la técnica de talla de presión, la cual se suponía que había surgido durante la «revolución» del Paleolítico Superior hace menos de 45.000 años. La punta roja se ha roto como consecuencia de un fuerte impacto, probablemente por haber sido usada como punta de proyectil. Esto indica que, en África, los primeros *Homo sapiens* habrían utilizado armas complejas unos 60.000 años antes que en Europa.

CORTESÍA DE JOHN J. SHEA

nos actuales produce a menudo instrumentos que resultan indistinguibles de los elaborados por *Homo habilis* o *Homo erectus*. Tales similitudes demuestran una misma técnica de talla y materia prima, pero no que, desde un punto de vista evolutivo, se trate del mismo tallador. Así, el registro arqueológico puede hallarse repleto de falsos negativos de comportamiento moderno durante la prehistoria.

El asunto atrajo mi interés en 2002, mientras excavaba en los yacimientos de 195.000 años de antigüedad de la formación Kibish del valle inferior del río Omo, en Etiopía. Soy arqueólogo, pero también tallador, y en las industrias líticas de Omo Kibish no descubrí ningún rasgo arcaico o primitivo. Cuando imparto clases de talla en la universidad, observo los progresos de los alumnos a medida que aumentan su destreza y motivación. Los instrumentos de Omo Kibish indicaban que sus fabricantes sabían tallar con versatilidad y eficacia diferentes tipos de roca. Fue eso lo que me condujo a replantearme si nos habíamos estado haciendo las preguntas correctas sobre el comportamiento de los primeros *Homo sapiens*.

UNA PROPUESTA MEJOR

A la hora de estudiar las diferencias entre pueblos prehistóricos, una propuesta más sólida que buscar pruebas de la transición al comportamiento moderno consiste en documentar y analizar la variabilidad conductual. Los humanos actuales podemos llevar a cabo casi cualquier actividad de múltiples maneras. En 1996, Richard Potts, de la Institución Smithsoniana, señalaba en *Humanity's descent* («El linaje de la humanidad») que nuestra gran variabilidad de comportamiento parece exclusiva de nuestra especie. Ninguna otra posee el repertorio de conductas de *Homo sapiens*. Y dicha variabilidad se presta mucho mejor a la investigación empírica que una clasificación de los humanos prehistóricos en términos de modernidad.

Una manera de calibrar la variabilidad conductual en los primeros *Homo sapiens* es a través del estudio de la industria lítica. Aunque esta no nos revela todo lo que nos gustaría saber sobre el comportamiento prehistórico, se encuentra sujeta a la misma presión selectiva que genera variaciones en las pruebas arqueológicas de cualquier otro tipo. Al igual que los artefactos líticos elaborados por humanos recientes resultan mucho más complejos y variables que aquellos fabricados por nuestros ancestros, los útiles de comienzos del Paleolítico también exhiben una mayor variedad que los fabricados por primates no humanos. Por tanto, existen razones para pensar que el análisis de la industria lítica puede proporcionarnos indicios claros sobre la variabilidad en el comportamiento de los primeros *Homo sapiens*. Un lugar idóneo para comparar la técnica lítica de los primeros *Homo sapiens* con la de los que vendrían después es África oriental, ya que allí se conserva el registro arqueológico más largo y continuo de nuestra especie. Además, al restringir el estudio a una misma zona, se minimiza la compleja influencia de los factores geográficos sobre las técnicas de tallado.

Una de las formas más utilizadas para describir la variabilidad de la industria lítica se basa en el esquema propuesto en 1969 por el arqueólogo Grahame Clark en *World prehistory: A new synthesis* («Prehistoria universal: Una nueva síntesis»), que distingue cinco técnicas o «modos» de tratamiento de núcleos. (En la talla, se denomina *núcleo* a la piedra de la que se extraen las lascas que después se trabajarán para obtener otros útiles.) Se cree que las diferentes técnicas de explotación de núcleos obedecen a adaptaciones al entorno. Aunque simple, observar qué modos se hallan presentes en un conjunto de útiles líticos supone un método razonable para cuantificar con precisión su variabilidad técnica. Al aplicarlo a los yacimientos de África oriental de entre 284.000 y 6000 años de antigüedad, obtenemos una imagen mucho más compleja de la prehistoria. Después de la aparición de nuestra especie, no se observa una acumulación continua de nuevos métodos de talla ni nada parecido a una «revolución». Antes bien, se aprecia una y otra vez una gran variabilidad técnica.

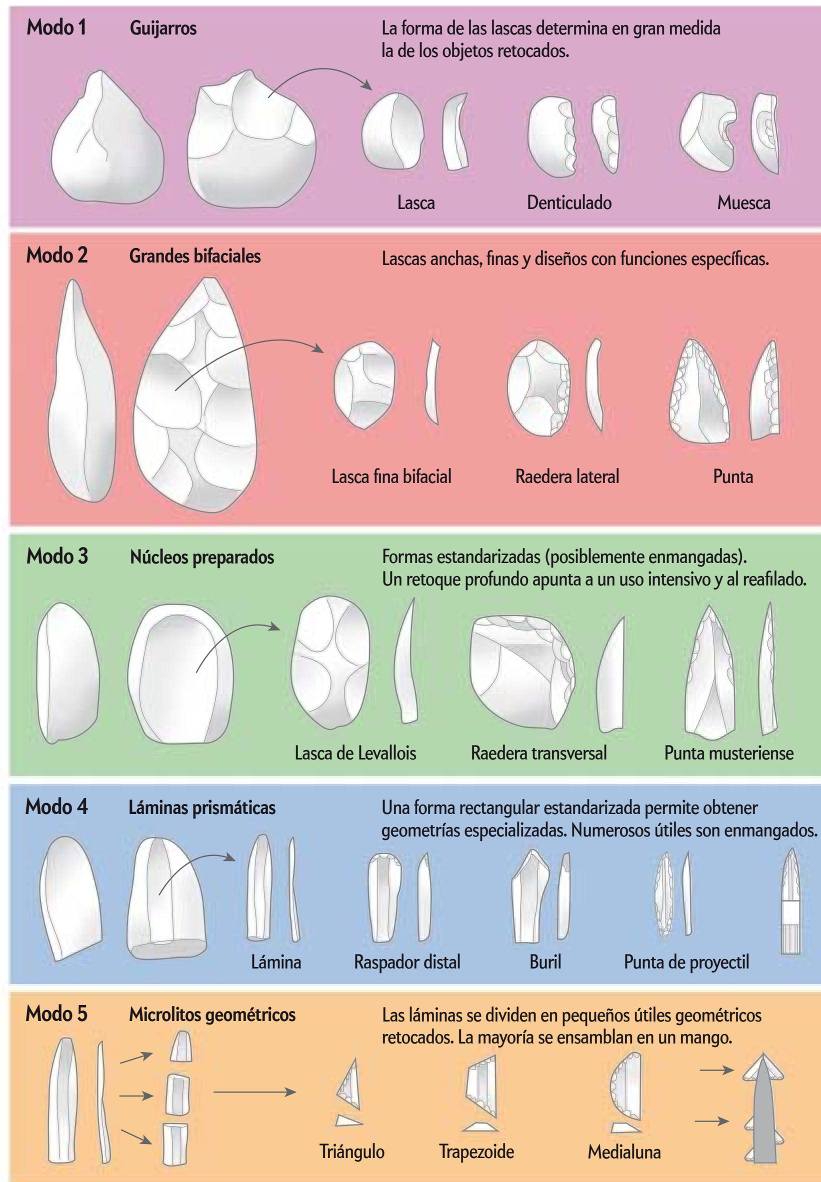
¿Qué significa esa variabilidad? Nuestro conocimiento de las técnicas de tallado no es perfecto, pero sabemos lo suficiente como para realizar interpretaciones plausibles. En la explotación de cantos rodados (modo 1 en la clasificación de Clark), el tallador obtiene lascas de forma oportunista a partir de guijarros, lo que constituye la manera más sencilla de obtener un filo cortante a partir de una piedra. En algunos lugares rurales del África oriental aún se emplea esta técnica. Su ubicuidad en los conjuntos arqueológicos probablemente se deba a que proporciona una manera expeditiva de obtener filos cortantes ante situaciones imprevistas.

Se cree que los grandes núcleos bifaciales (modo 2) cumplían un objetivo doble. Su tamaño y sus largos bordes afilados se muestran muy eficaces para realizar tareas pesadas, como trabajar la madera o desmembrar presas de gran tamaño. Por otra parte, las lascas finas obtenidas a partir de dichos núcleos resultan apropiadas para tareas de corte más delicadas y, a su vez, pueden retocarse para obtener útiles más especializados. En contextos arqueológicos recientes, los grandes útiles bifaciales se han relacionado con pueblos nómadas, mientras que la explotación de cantos rodados se ha asociado a poblaciones más sedentarias. En la actualidad, los cambios estacionales fuerzan a los pastores africanos a trasladar su lugar de residencia. La persistencia de esta técnica reflejaría una movilidad elevada por parte de los grupos prehistóricos de la región.

TÉCNICAS DE TALLADO

Variabilidad compleja

Aquí se reproducen los cinco modos técnicos propuestos por Grahame Clark (*izquierda*) y los patrones de variabilidad en el comportamiento (*derecha*). Clark clasificó las industrias líticas según el tipo de núcleo (piedra de la que se extraen las lascas) y la manera en que las lascas se trabajaban para obtener útiles. Este esquema permite identificar la variabilidad en función de las adaptaciones al entorno en varios lugares al mismo tiempo (sincrónica) o a lo largo del tiempo (diacrónica). Una variabilidad compleja indica el solapamiento de ambas.



Variabilidad sincrónica (eje vertical: Tiempo; eje horizontal: Espacio)

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5

Variabilidad diacrónica (eje vertical: Tiempo; eje horizontal: Espacio)

5	5	5	5	5
4	4	4	4	4
3	3	3	3	3
2	2	2	2	2
1	1	1	1	1

Variabilidad compleja (eje vertical: Tiempo; eje horizontal: Espacio)

5	5	3	4	5
4	2	3	4	4
1	2	3	3	3
1	2	2	2	3
1	1	2	1	3

La interpretación conductual de los núcleos preparados según el método de Levallois (modo 3) no quedaría tan clara, en parte porque el término engloba diferentes tipos de talla. Los preparados de Levallois perseguirían obtener formas determinadas, o bien producir lascas anchas y finas con un filo susceptible de volver a afilarse. Ambas hipótesis se muestran compatibles y, en parte, ambas explicarían por qué los humanos del África oriental han utilizado esta técnica durante tanto tiempo.

En la técnica de lascas prismáticas (modo 4), se extraen sucesivas láminas largas y rectangulares a partir de un núcleo de forma cónica. La explicación más común afirma que el método persigue maximizar la cantidad de filo que puede obtenerse de una piedra. Sin embargo, Metin Eren, de la Universidad Metodista del Sur, y sus colaboradores han demostrado la falsedad de esta hipótesis. Una ventaja mucho mayor de esta técnica reside en que la regularidad morfológica de las láminas facilita su unión a un mango. Ello permite aumentar el brazo de palanca y la eficacia mecánica de este, al tiempo que limita el movimiento del instrumento y la porción que puede volver a afilarse. La aparición y desaparición de la explotación laminar en África oriental quizá refleje la interacción de todas estas posibilidades.

PRUEBA ARQUEOLÓGICA

Un mosaico de técnicas líticas

La clasificación de Clark se ha empleado para estudiar los yacimientos del África oriental con una antigüedad inferior a los 250.000 años. Sobre el mapa se indican los yacimientos con abundante número de artefactos y bien datados (*círculos negros*), así como los lugares en los que se han hallado menos pruebas o que no han sido objeto de una excavación sistemática (*círculos huecos*). Destaca que cuatro de los cinco modos de Clark, que reflejan diferentes grados de complejidad técnica, se hayan documentado en todas las épocas. Solo la técnica de microlitos es exclusiva de los yacimientos más recientes.





Yacimientos	Antigüedad (años)	Clasificación de Clark				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
Lowasera, Kenia	<7000	●	●	●		●
Lothagam, Kenia	6000–7000	●	●	●	○	●
Colina de Lukenya 2 (GvJm 22, GvJm 16), Kenia	13.000–17.000	●	●	●	●	●
Cueva de Porc Epic, Etiopía	61.000–78.000	●		●	○	●
Valle del Awash medio, Aduma y Bouri MSA 1-3, Etiopía	80.000–100.000	●	●	●	○	
Arrecife de Abdur, Complejo de caliza, Eritrea	125.000	○	●	●		
Valle del Awash medio, miembro Herto, formación Bouri, Etiopía	160.000	●	●	●	○	
Valle inferior del Omo, miembros 1-3 de la formación Kibish, Etiopía	>104.000–195.000	●	●	●	○	
Gademotta/Kulkuletti, Etiopía	175.000–278.000	●	●	●	●	
Baringo occidental, formación Kapthurin, Kenia	234.000–284.000	●	●	●	●	

Los microlitos geométricos (modo 5) se han encontrado en cantidades variables en la mayoría de los yacimientos del África oriental, tanto en los antiguos como en los más recientes. Obtenidos mediante la fractura de láminas o lascas, eran útiles pequeños a los que se había dado la forma de triángulos, rectángulos, semicírculos y otras geometrías tras hacer romos algunos de los filos. Resultaban demasiado pequeños para ser usados directamente con la mano, por lo que casi con seguridad se enmangaban, pues podían engancharse con facilidad a un soporte para emplearse como proyectiles, instrumentos para trabajar la madera o herramientas para preparar alimentos vegetales.

La técnica microlítica optimizaba la versatilidad y reducía los riesgos. Apareció y se difundió entre los grupos africanos y eurasiáticos hace entre 50.000 y 10.000 años. Ese período se caracterizó por grandes variaciones climáticas, por lo que parece natural que se ideasen útiles versátiles y fáciles de transportar. Si, forzado por el clima, un grupo se veía obligado a cambiar la caza por la recolección, los mismos microlitos que servían a modo de flechas también podían emplearse para construir hoces, todo ello sin mudar de técnica. En virtud de su diminuto tamaño, los microlitos cuentan con una gran longitud de corte con relación a su peso. Ello implicaba que, en las migraciones estacionales, podía transportarse más filo en una misma carga. La variabilidad en el uso de la técnica microlítica en África oriental probablemente reflejase una estrategia para afrontar la imprevisibilidad ambiental y asegurar la supervivencia.

¿Qué relación guardan las diferencias observadas entre los yacimientos africanos de distintas épocas con las variaciones entre las poblaciones recientes que aún utilizan instrumentos líticos? La variabilidad de las técnicas líticas de los humanos actuales supera a la registrada en los yacimientos del África oriental. Los cinco modos de explotación propuestos por Clark se dan hoy, pero no todas las técnicas se encuentran en el conjunto africano. Hace unos 30.000 años, en Australia primero y en otros lugares después, se empezaron a pulir y afilar los bordes de los instrumentos. Los filos pulidos oponen una fricción menor, lo que aumenta su eficacia y facilita afilados posteriores. En el Nuevo Mundo, los talladores indígenas desarrollaron un amplio abanico de técnicas distintas de las que se observan en África oriental. Los útiles se emplearon en distintos contextos, desde campamentos de grupos de cazadores-recolectores en las Grandes Llanuras hasta en las ciudades-estado de Mesoamérica, como Teotihuacán. Las diferencias entre las técnicas reflejan distintas estrategias adaptativas. Nadie en su sano juicio atribuiría dicha variabilidad a las diferencias evolutivas entre los distintos grupos actuales. Si tales explicaciones carecen de sentido en la actualidad,

¿qué valor pueden tener para dar cuenta de la variabilidad conductual en los antiguos *Homo sapiens*?

La prueba lítica que hemos descrito aquí desafía la hipótesis de que en África oriental surgieron diferencias de comportamiento significativas entre los primeros representantes de nuestra especie y otros más recientes. Por supuesto, la variabilidad en el comportamiento abarca mucho más de lo que refleja la industria lítica. Pero aunque la aplicación de los modos de Clark para medir dicha variabilidad solo constituya un primer paso, supone sin duda un paso hacia delante.

ABANDONAR UN MITO

Alguien podría argumentar que estos hallazgos solo indican que algunos comportamientos modernos habrían aparecido de manera precoz entre los primeros *Homo sapiens* de África. En mi opinión, nos enseñan mucho más. Después de todo, solo podemos calificar algo como «precoz» cuando es inesperado. La hipótesis de que hubo humanos anatómicamente modernos pero con un comportamiento distinto del nuestro no solo contradice los principios del uniformismo —que afirma que las explicaciones sobre el pasado deben basarse en lo que sabemos sobre el presente—, sino también la teoría evolutiva y las pruebas arqueológicas. No conocemos ninguna población de *Homo sapiens* que sufriese limitaciones biológicas para desarrollar un comportamiento variable. Antropólogos de distintas generaciones han buscado en vano este tipo de pueblos primitivos en todos los rincones del planeta. La interpretación más sencilla de ese fracaso es que dichos humanos no existieron.

Tampoco existe ninguna razón para creer en un *Homo sapiens* con un comportamiento arcaico. Si en algún momento hubo un número significativo de *Homo sapiens* cuyas limitaciones cognitivas le impidieron desarrollar una variabilidad conductual, la selección natural se habría encargado de hacerlos desaparecer. En los crueles ecosistemas del Pleistoceno en los que evolucionó nuestra especie, los individuos menos adaptados no tenían ninguna posibilidad de sobrevivir. Si alguna vez se produjo una extinción de esta clase, con toda seguridad aconteció entre grupos de homínidos más antiguos (*Homo ergaster/erectus* o *Homo heidelbergensis*) o a lo largo de la diferenciación evolutiva que separó a nuestra especie de esos homínidos.

Dividir a *Homo sapiens* en dos categorías, modernos y arcaicos, y apelar a la evolución de la modernidad del comportamiento para explicar sus diferencias no parece una buena propuesta. Refleja, al igual que el desacreditado concepto científico de raza, una jerarquía y un pensamiento tipologista de la variabilidad humana que carece de toda base antropológica. De hecho, podríamos afirmar que el concepto de modernidad conductual se antoja peor que incorrecto, ya que supone un obstáculo para la comprensión de nuestra especie. Se han malgastado mucho tiempo, energía y recursos en la discusión sobre la modernidad del comportamiento que podrían haberse invertido en investigar las fuentes de la variabilidad de determinadas estrategias de comportamiento o en comprobar las hipótesis al respecto.

A principios del siglo xx, el etnólogo Franz Boas se opuso a los antropólogos evolutivos que clasificaban a las diferentes sociedades de la época en una escala evolutiva de más primitiva a más desarrollada. Sus argumentos fueron acogidos por muchos; hoy constituyen un principio básico de la antropología moderna. La arqueología de nuestros orígenes necesita un cambio similar. Debemos dejar de ver los artefactos como expresiones de estadios evolutivos y empezar a entenderlos como productos de estrategias de comportamiento.

Las diferencias que observemos en tales estrategias nos obligarán a plantearnos nuevos interrogantes. ¿Pueden surgir diferentes clases de variabilidad conductual a partir de situaciones ambientales similares? ¿Se dan diferencias en la estabilidad de determinadas estrategias de comportamiento? ¿Se encuentra alguna de esas estrategias asociada a algún homínido particular? Y si es así, ¿por qué? Si nos centramos en el estudio de la variabilidad conductual, adoptaremos un enfoque más científico sobre el origen de nuestra especie. En cambio, el concepto de modernidad conductual no nos conduce a nada.

Incluso en la actualidad, la imagen popular del poblador prehistórico sigue siendo la del hombre de las cavernas: un individuo con cejas pronunciadas, rostro prognato, cabello largo y barba que no puede hablar bien, de inteligencia dudosa y con una capacidad de innovación muy limitada. Por fortuna, la arqueología moderna está derribando esta concepción errónea sobre el origen del comportamiento humano.

PARA SABER MÁS

The revolution that wasn't: A new interpretation of the origin of modern human behavior. S. McBrearty y A. S. Brooks en *Journal of Human Evolution*, vol. 39, págs. 453-563, 2000.

The middle stone age archaeology of the lower Omo Valley kibish formation: excavations, lithic assemblages, and inferred patterns of early *Homo sapiens* behavior. J. J. Shea en *Journal of Human Evolution*, vol. 55, n.º 3, págs. 448-485, 2008.

¿Pensaban los neandertales como nosotros? Kate Wong en *Investigación y Ciencia*, agosto de 2010.

***Homo sapiens* is as *Homo sapiens* was: Behavioral variability versus «behavioral modernity» in paleolithic archaeology.** J. J. Shea en *Current Anthropology*, vol. 52, n.º 1, págs. 1-35, 2011.

AGRICULTURA

Malas hierbas resistentes

Varias especies de malezas eluden las técnicas avanzadas que intentan impedir su proliferación en los cultivos de todo el mundo

Jerry Adler

Regreso al pasado: Una cuadrilla de jornaleros en una granja de Arkansas debe recurrir a la antigua práctica de arrancar con la azada las malas hierbas que se han vuelto resistentes al glifosato, el principio activo del herbicida Roundup.

EN SÍNTESIS

Los herbicidas químicos mantienen a raya la naturaleza solo algún tiempo, ya que en última instancia las malas hierbas terminan por desarrollar resistencia a esos productos.

Las malezas han empezado a presentar resistencia al glifosato, el ingrediente principal del herbicida Roundup. Los cultivos de mayor importancia económica han sido modificados genéticamente para resistir la acción de este producto.

Los agrónomos deben buscar ahora nuevas estrategias para proteger las plantaciones. Mientras, algunos críticos sostienen que debe reexaminarse el empleo de la ingeniería genética.

Jerry Adler fue editor de la revista *Newsweek* desde 1979 hasta 2008. Ha escrito sobre diversos temas relacionados con la ciencia, entre ellos, los perfiles de Stephen Hawking y Sally K. Ride.



La segunda semana de noviembre, el centro de Indiana se convierte en un mosaico de colores tostados y negros: aquí un campo cubierto de rastrojo de maíz y plantas de soja; un poco más allá, la tierra desnuda, donde el agricultor ha enterrado los residuos de la cosecha del verano anterior. El suelo se halla preparado para el cultivo, y aun así, si nos acercamos podemos distinguir algunos brotes de malas hierbas crecidas en otoño: pamplinas, hierba cana y ortigas de color púrpura. En un invernadero del campus de la Universidad de Purdue (Indiana), Chad Brabham, estudiante de postgrado especializado en malherbología, selecciona dos tiestos, cada uno con una planta de medio metro de altura, con hojas trilobuladas serradas que emergen de un tallo grueso. Se trata de una especie que crece con frecuencia en los terrenos baldíos o junto a las carreteras de Norteamérica. *Ambrosia trifida*, la ambrosía gigante, es una mala hierba de aspecto desagradable, igual que su prima *A. artemisifolia*, la ambrosía común, una planta que succiona gran cantidad de agua y produce polen alergénico.

Durante unos cincuenta años, esas plantas se han mantenido a raya gracias sobre todo al empleo de herbicidas químicos. Uno de los más utilizados ha sido el glifosato, el principio activo de algunos productos para erradicar malezas, como el Roundup de Monsanto. Brabham coloca las dos macetas en una cámara de pulverización y llena un pequeño depósito con una solución de la sal potásica de glifosato. Un cabezal aspersor deslizante atraviesa la cámara de extremo a extremo y empapa las hojas de color gris verdoso con una dosis que debería ser letal. Brabham retira las macetas y las devuelve a la mesa de cultivo. Lo que les suceda a estas malas hierbas en las próximas 24 horas reflejará, en un microcosmos, aquello a lo que los agricultores del medio oeste de EE.UU. se enfrentan esta temporada.

Por los problemas secundarios que lleva asociados, el glifosato despierta una enorme inquietud. «Yo no usaría la palabra 'catástrofe', pero hay quien afirma que podría ser lo peor para los cultivadores de algodón desde la plaga del picudo del algodón.» Así se manifiesta Doug Gurian-Sherman, fitopatólogo y científico senior de la Unión de Científicos Preocupados, cuando habla sobre la propagación de malas hierbas resistentes al glifosato, también conocidas como «malas hierbas superresistentes» o «supermalezas». En el último decenio, su área de distribución en EE.UU. ha aumentado desde la presencia ocasional hasta ocupar unos cuatro millones de hectáreas. Esa extensión todavía representa una pequeña parte de los casi 162 millones de hectáreas de la superficie agrícola del país, pero se ha quintuplicado desde 2007.

«Es un salto enorme en la dispersión de esas plantas, y no creo que nadie lo esperase», comenta David Mortensen, especialista en malherbología de la Universidad estatal de Pennsylvania. El pasado verano se celebró una audiencia del Congreso convocada por el miembro de la Cámara de representantes Dennis J. Kucinich, de Ohio, para que el Departamento de Agricultura de EE.UU. investigase la regulación de las semillas transgénicas. Kucinich afirmó que había razones para creer que la tendencia continuaría. Si las plantas resistentes se propagan sin control, nos hallaremos ante una catástrofe que ya se había previsto y que, por tanto, podría haberse evitado.

Como las bacterias resistentes a los antibióticos, que hacen temer lo peor a los especialistas en enfermedades infecciosas, se trata de un problema creado por nosotros mismos, un recordatorio de la futilidad del intento de escapar de la evolución. Y un aumento de las malas hierbas resulta indeseable en un mundo que puede toparse con límites técnicos en la producción de alimentos.

La acción destructora del herbicida

Quienes observan los campos de maíz desde un avión tal vez no aprecien el esfuerzo que supone impedir el desarrollo de malas hierbas en los cultivos. De hecho, la palabra cultivar no solo significa «hacer crecer algo», sino también «arar o labrar la tierra». Esa práctica representaba el método original de eliminar las malezas, al arrancar de raíz las plantas no deseadas y enterrar sus semillas. Las malas hierbas carecen del sigilo y la agresividad mortífera de los insectos y los microbios, que pueden afectar a la cosecha tras aparecer como de la nada y acabar con ella en cuestión de días. Las malas hierbas crecen de manera visible y atacan las plantas vecinas de forma indirecta, robándoles nutrientes, agua y, sobre todo, la luz del sol. Pero los insectos y las enfermedades de las plantas suelen ser esporádicos, acontecimientos que pueden tener éxito o fracasar, mientras que las malas hierbas medran por doquier. Una sola planta de ambrosía gigante puede reducir hasta la mitad el rendimiento de una superficie donde crecen 30 plantas de soja.

De ahí que los agrónomos se mantengan vigilantes ante ciertas especies de malas hierbas —diez en el último recuento en EE.UU. y un número aproximadamente igual en el resto del mundo—, algunas de cuyas poblaciones han desarrollado la capacidad de soportar una dosis normalmente letal de glifosato. Aun así, los portavoces de Monsanto se apresuran a señalar que más de 300 especies siguen mostrando sensibilidad al Roundup. Pero esas diez representan unas de las plagas más prolíficas e intratables que infestan el algodón, el maíz y los campos de soja: la ambrosía común y la gigante, diferentes especies de *Conyza*, el sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*) y varias especies de *Amaranthus*. *Amaranthus palmeri*, considerada el «monstruo» de las malas hierbas, desarrolla tallos tan gruesos como un bate de béisbol y tan duros como para estropear una cosechadora que tenga la desgracia de dar con ella. En su forma resistente a los herbicidas, resulta casi incontrolable, comenta Thomas T. Bauman, científico especializado en malas hierbas en Purdue. «A su lado, la ambrosía gigante (que puede superar

BRAD LUTTRELL (*páginas anteriores*)



los tres metros de altura) parece pequeña. Y germina en cualquier época del año; cuando crees que has terminado con ella, la siguiente vez que llueve vuelve a aparecer.» Algunos cultivadores de algodón han tenido que abandonar los campos donde esa maleza se ha adueñado del lugar. Otros han retrocedido hacia las prácticas agrícolas de hace un siglo y están enviando cuadrillas de jornaleros a sus campos para arrancarla con la azada. «He visto más jornaleros en el campo (en 2010) que en los últimos quince años juntos», comenta David R. Shaw, vicerrector de investigación y desarrollo de la Universidad estatal de Mississippi. «Es un trabajo increíblemente duro», añade, «y dificulta en extremo la obtención de beneficios».

Los agricultores de los países desarrollados creían haber dejado atrás ese tipo de labores, con la aparición en escena, después de la Segunda Guerra Mundial, de los herbicidas orgánicos. Cabe mencionar el 2,4-D (2,4 diclorofenoxiacético), el primero de una gran clase de herbicidas que imitan la hormona auxina y llevan la planta a un crecimiento descontrolado que le provoca la muerte. Otras clases de herbicidas atacan otros procesos, como la fotosíntesis o el transporte de nutrientes. El glifosato inhibe la enzima EPSPS (5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa), responsable de la síntesis de tres aminoácidos esenciales en las plantas y las bacterias, pero no en animales, lo que ha sido crucial para su adopción generalizada. El producto ataca las células del meristemo e impide el crecimiento de las yemas y del ápice de la planta. Al día siguiente de su aplicación, la planta deja de crecer, y suele morir en una o dos semanas.

A diferencia de otros compuestos que imitan la auxina, que destruyen de modo selectivo las plantas de hoja ancha pero suelen resultar inocuos para las gramíneas, el glifosato ataca todos los tejidos verdes. Y a diferencia de los herbicidas que se esparcen sobre el suelo antes de que las malas hierbas emerjan en primavera, debe aplicarse directamente sobre las hojas de las plantas que deseamos erradicar. Esas características limitaron la utilidad del glifosato en los decenios posteriores a su descubrimiento, en 1970. Los agricultores lo utilizaban a principios de primavera, tras la aparición de las primeras malezas y antes de que la planta cultivada brotara; o bien, durante el período de crecimiento, mediante el método laborioso de ir rociando las malas hierbas que crecían entre las plantas cultivadas. Michael Owen, agrónomo de la Universidad estatal de

CHERIE SINNEN

Iowa, describe el control de las malas hierbas durante aquellos años como un arte y una ciencia, un malabarismo continuo entre la aplicación de herbicidas, la rotación de cultivos y el arado de otoño y primavera a distinta profundidad; esas tareas exigían una inversión en tiempo y dinero que debía sopesarse frente a la posible disminución de la cosecha. Cada técnica solía controlar un conjunto diferente de malas hierbas o, dicho de otro modo, se concentraba en las especies resistentes al tratamiento, aquellas que crecían muy bien a pesar del plaguicida. El problema de las malezas es acumulativo, porque las semillas se depositan en el suelo año tras año. Para llevar la delantera a esas plantas debían utilizarse diferentes estrategias y cambiarlas con frecuencia, ya que las malas hierbas prosperan ante condiciones predecibles.

SITUACIÓN EN ESPAÑA

Otras medidas para controlar las malas hierbas

Aunque el riesgo de aparición de resistencias en Europa resulta menor que en otras zonas, convendría evitar la dependencia exclusiva de los herbicidas

JORDI IZQUIERDO

La creciente dependencia de los herbicidas en muchos cultivos que se realizan en España está comportando la aparición de poblaciones de malas hierbas resistentes a los productos aplicados. ¿Cómo se origina una resistencia? Las poblaciones de malas hierbas están compuestas por individuos (biotipos) con genotipos ligeramente diferentes entre sí, alguno de los cuales no resulta afectado por los herbicidas. Al hacer un uso repetido de un mismo producto o de productos con un modo de acción similar se favorecerá la supervivencia y persistencia de los biotipos resistentes y se tenderá a eliminar los biotipos sensibles. Tras diversos años de cultivo, esa «presión de selección» llevará a la dominancia del biotipo resistente en la población vegetal, que alcanzará un nivel de densidad tal que impedirá su control adecuado con el herbicida.

El primer informe de la existencia de un biotipo de mala hierba resistente a herbicidas en España data de 1981. En ese año se hallaron en campos de maíz ejemplares de *Panicum dichotomiflorum* resistentes a atrazina, herbicida perteneciente a la familia de las triazinas. El último caso de resistencia fue descrito en 2009, al observar que *Conyza sumatrensis* no respondía al glifosato en campos de frutales.

De acuerdo con una base de datos internacional sobre malezas resistentes, en España se han identificado hasta ahora 25 especies en diferentes cultivos, aunque 17 de ellas son resistentes a herbicidas de la antigua familia de las triazinas que, en su mayoría, ya no se comercializan en la Unión Europea. En el olivar andaluz y los campos de cítricos valencianos, el uso repetido de glifosato para mantener la superficie del suelo libre de malas hierbas ha conllevado la aparición de resistencias a ese herbicida en los géneros *Conyza* y *Lolium*. En los cultivos de cereales, distintas malezas han desarrollado resistencias a las familias de herbicidas más utilizados: *Lolium rigidum* (vallico, también presente en frutales) a los fops, dims y sulfonilureas; *Papaver rhoeas* (amapola) a las auxinas sintéticas y sulfonilureas, y *Avena sterilis* (avena loca) a fops, dims e imidazolinonas. En el arroz, cultivo de gran importancia económica, están apareciendo biotipos de *Echinochloa* spp. con resistencia. Los biotipos con resistencias múltiples resultan muy difíciles de controlar con herbicidas. Es de esperar que, con el desarrollo de pruebas rápidas de detección de resistencias en el laboratorio, el número de biotipos resistentes identificados se incrementará.

En las zonas donde se han detectado plantas resistentes resulta difícil calcular las hectáreas afectadas, ya que no hay estudios detallados al respecto. La proliferación de malezas observada en el campo no siempre se debe a una resistencia de la mala hierba, sino que puede deberse a una mala aplicación del producto o a unas condiciones ambientales adversas para la acción del herbicida. El área afectada con vallico resistente, por ejemplo, se estima en menos del 10 por ciento de los 6 millones de hectáreas sembradas con cereal de invierno en España.





JORDI IZQUIERDO (*fotografías*), BASE DE DATOS INTERNACIONAL SOBRE MALAS HIERBAS RESISTENTES, WWW.WEEDSCIENCE.COM (*tabla*)

Plantas de vallico (*izquierda*) y amapola (*derecha*), dos especies con resistencia múltiple que proliferan en los campos de cereales.

CULTIVOS RESISTENTES, LA REVOLUCIÓN

Todo cambió a principios de los años noventa, cuando Monsanto perfeccionó la técnica de crear especies cultivadas con resistencia al glifosato. Dejando de lado otras consideraciones, esa innovación constituyó un logro científico que costó, según las estimaciones de Monsanto, unas 700.000 horas-persona de tiempo dedicado a la investigación. Una pesquisa de siete años para hallar el gen adecuado terminó en un tubo de desagüe de un centro de Monsanto en Louisiana. Allí, los investigadores que buscaban organismos que sobrevivieran en el residuo líquido de glifosato descubrieron una bacteria que había mutado y producía una forma ligeramente modificada de la enzima EPSPS. La enzima alterada seguía sintetizando los tres aminoácidos, como la enzima normal, pero no resultaba afectada por el glifosato. Los

Malas hierbas resistentes a los herbicidas que se aplican hoy en España

Especie	Detectada en el año...	En un cultivo de...	Localización
Alisma plantago-aquatica	2000	Arroz	No especificada
Alopecurus myosuroides	1991	Cereal	Cataluña
Avena sterilis	2000	Cereal	La Rioja, Navarra, Castilla y León
Bromus tectorum	1990	Cereal	Andalucía
Conyza bonariensis	1987	Olivar	Andalucía
Conyza canariensis	2006	Olivar	Andalucía
Conyza sumatrensis	2009	Olivar	Andalucía
Cyperus difformis	2000	Arroz	Extremadura
Echinochloa spp	1998	Arroz	Extremadura, Andalucía, Cataluña
Lolium multiflorum	2006	Olivar	Andalucía
Lolium rigidum	1992	Cereal Olivar Cítricos	Aragón, Cataluña Andalucía C. Valenciana
Papaver rhoeas	1993	Cereal	Aragón, Castilla y León, Cataluña, Navarra
Sinapis alba	2007	Cereal	Andalucía

Según datos de la Asociación Empresarial para la Protección de Plantas (AEPLA), que representa mayoritariamente al sector de fabricantes de productos fitosanitarios de España, en el año 2009 se vendieron 22.000 toneladas de herbicidas por un valor de 219 millones de euros. La presión de selección hacia biotipos resistentes es fuerte; sin embargo, el alcance del problema no es tan preocupante como en otros países. En España y Europa no hay extensiones tan grandes y continuas dedicadas a un único cultivo (como así ocurre en el continente americano), ni tampoco hay registradas variedades tolerantes a los herbicidas. En general, las variedades plantadas por el agricultor son las más adaptadas a las características edafoclimáticas de cada localidad. Debido a que el área de distribución de la variedad se halla limitada, el riesgo de rápida expansión de un biotipo resistente resulta menor.

Otras soluciones

En todos los casos, la aparición de resistencias guarda una relación directa con el empleo casi exclusivo del control químico. Un hecho que puede favorecer el incremento de resistencias en el futuro es la menor disponibilidad de materias activas en el mercado. El nuevo registro europeo unificado de productos fitosanitarios tiene un menor número de materias activas herbicidas, lo que aumenta la probabilidad de que aparezcan biotipos resistentes debido al uso reiterado de unos pocos compuestos.

De ahí la importancia de diversificar las técnicas de control y de reducir al máximo la dependencia exclusiva de los herbicidas. Se ha demostrado que la prevención representa la opción más fácil y barata a largo plazo para evitar el problema de la resistencia. Con el fin de promocionar medidas que eviten la aparición de resistencias y de contribuir a la sostenibilidad de la actividad agraria se han creado grupos de trabajo que aglutinan a fabricantes, empresas distribuidoras, agricultores y servicios oficiales de la Administración dedicados a la investigación, transferencia y legislación agrícolas. Cabe citar, en España, el Comité para la Prevención de las Resistencias a los Herbicidas (CPRH); en Europa, el Grupo de Trabajo Europeo contra la Resistencia a Herbicidas (EHRWG) y, a nivel mundial, el Comité de Acción contra la Resistencia a Herbicidas (HRAC).

De esos grupos se promueve un manejo integrado de las malas hierbas, es decir, la aplicación de diferentes medidas sin dependencia excesiva en ninguna de ellas, para mantener una densidad de malas hierbas que no produzca pérdidas económicas para el agricultor. Al aplicar esas medidas de forma integrada se reduce la presión de selección sobre una determinada mala hierba, con lo que se retrasa o evita la aparición de resistencias; además, algunas de esas prácticas contribuyen a mejorar las características fisicoquímicas del suelo.

Entre las recomendaciones, cabe citar el empleo de semillas certificadas libres de malas hierbas, la rotación de cultivos, el laboreo del suelo, una buena densidad de siembra, la «falsa siembra» (labrar el campo, dejar que emerjan las malas hierbas y eliminarlas mediante un laboreo o un herbicida antes de sembrar el cultivo), el pastoreo después de la cosecha, dejar una cubierta vegetal en frutales (capa herbácea natural o sembrada que se regula mediante siegas periódicas) o el uso alternado de herbicidas con diferente modo de acción.

Si bien en algunos países también se dispone de cultivos tolerantes a herbicidas como otra herramienta de lucha contra las malas hierbas, la aplicación a gran escala de un único herbicida y su uso repetido favorecerán de modo inevitable la aparición de resistencias.

Resulta importante recalcar que el manejo integrado de las malas hierbas presupone que para mantener el rendimiento del cultivo no es preciso erradicar por completo la flora arvense (malas hierbas) del campo, sino tan solo mantenerla por debajo de una densidad determinada (umbral de tratamiento). La presencia de otras especies vegetales distintas a la planta cultivada ejerce un efecto beneficioso sobre la sostenibilidad del agroecosistema, ya que favorece la biodiversidad. La existencia de una flora arvense proporciona cobijo a las especies silvestres, como pájaros y pequeños mamíferos, que a menudo funcionan como enemigos naturales de las plagas. Además, la presencia de una capa herbácea en un campo reduce la erosión del suelo, permite el paso de maquinaria tras las lluvias y, en ciertos casos, incrementa el valor estético del paisaje. Todo ello, sin olvidar que la actividad agraria debe continuar siendo rentable para el agricultor.

Jordi Izquierdo
Dpto. de ingeniería agroalimentaria y biotecnología
Universidad Politécnica de Cataluña



Entre las malas hierbas enemigas de los agricultores del medio oeste de EE.UU. se encuentran (*de izquierda a derecha*) el amaranto gigante (*Amaranthus palmeri*), *Conyza canadensis* y el sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*); todas ellas han desarrollado el mismo nivel de resistencia al herbicida Roundup.

ALAMY (*amaranto gigante*); JOEL SARTORE *Alamy* (*Conyza canadensis*); NIGEL CATTLIN *Alamy* (*sorgo de Alepo*)

científicos aislaron el gen que codificaba esa propiedad y, junto con varios genes constitutivos (para el control y la inserción del gen de la enzima) procedentes de otros tres organismos, los implantaron en las células de soja con un cañón de ADN.

Esa técnica «de fuerza bruta» consiste en recubrir con el ADN seleccionado unas partículas microscópicas de oro que se proyectan a los embriones de la soja, con la esperanza de que al menos unas pocas hallen su camino hacia el lugar correcto en un cromosoma. Tras decenas de miles de ensayos se consiguió un puñado de plantas resistentes al glifosato, que pasaron esa característica a sus descendientes. A partir de 1996, Monsanto comenzó a vender las nuevas semillas de soja Roundup Ready. Poco después aparecieron las semillas de algodón, colza y maíz resistentes al herbicida.

La innovación representó un triunfo comercial. Las semillas Roundup Ready revolucionaron el cultivo de algunos productos agrícolas básicos de EE.UU. y de todo el mundo, especialmente de Argentina y Brasil. Animados por la publicidad de Monsanto, los agricultores se deshacían de sus problemas sembrando semillas Roundup Ready y rociando sus campos con glifosato cada vez que aparecían malas hierbas. El año pasado, las semillas Roundup Ready se sembraron en el 93 por ciento de la superficie plantada de soja en EE.UU. y en una gran mayoría de la de maíz y algodón. Las estimaciones de la demanda mundial del producto en 2010 se elevan hasta casi un millón de toneladas.

Sin embargo, no está muy claro que esa técnica haya ayudado realmente a los agricultores a producir más alimento. A la industria biotecnológica le gusta afirmar que así ha sido, pero en 2009, un estudio de la Unión de Científicos Preocupados llegó a la conclusión de que las ganancias eran pocas y se veían superadas con creces por los métodos avanzados del cultivo clásico, mucho menos costosos. Pero el sistema Roundup Ready presentaba otras ventajas. La mayoría de los expertos coinciden en que, entre los plaguicidas orgánicos sintéticos, el glifosato es uno de los menos tóxicos y persistentes. Y al utilizarlo en cultivos Roundup Ready, los agricultores no necesitaban labrar tanto los campos. La siembra directa o con labranza mínima, que comenzó a generalizarse en la década de los ochenta, ahorra combustible y reduce la erosión y la escorrentía de los nutrientes hacia las vías fluviales. El glifosato «es un compuesto de extraordinaria eficacia para erradicar plantas», afirma John Lydon, principal investigador de malas hierbas del Departamento de Agricultura de EE.UU., «y uno de los productos agrícolas más benignos que se usan en la actualidad».

Pero esa situación en apariencia óptima no perduraría mucho. «Las malas hierbas se hallan en constante evolución y se adaptan a las altas presiones de selección impuestas por las prácticas agrícolas», apunta Stephen Weller, horticultor de Purdue. La resistencia al glifosato apenas se conocía en los años anteriores al uso del Roundup. Pero desde entonces ha aparecido en nuevas especies de malas hierbas, con una frecuencia media de una planta resistente por año. Según Bauman, la aplicación de un herbicida a un mismo cultivo año tras año, sin otras medidas de control de malas hierbas que la acompañen, crea un laboratorio perfecto para la evolución de la resistencia. «La planta resistente siempre está ahí. Basta con aplicar el herbicida para favorecer su proliferación».

La primera pregunta que uno se plantea acerca de las malas hierbas resistentes al glifosato es si presentan el mismo mecanismo de resistencia que las semillas Roundup Ready. Es decir, ¿ha saltado el gen la barrera de las especies, desde los cultivos hasta las malas hierbas? Owen, que expresa el consenso de los biólogos vegetales, opina que no; las malas hierbas de EE.UU. son demasiado distintas de la soja, el maíz o el algodón para cruzarse con ellas. (Sin embargo, algunas plantas poseen un estrecho parentesco con ciertas malas hierbas, por lo que hay que valorar el riesgo de introducir en ellas genes de resistencia al herbicida; tal es el caso de *Agrostis palustris*, el césped que sue-

le emplearse en los campos de golf.) Bajo la presión evolutiva del glifosato, las malas hierbas han desarrollado sus propias defensas. El amaranto resistente posee la forma normal del gen EPSPS, no el alelo alterado diseñado por Monsanto. Pero el gen normal presenta numerosas copias, de 5 a 160, y en consecuencia produce la enzima en cantidades que superan con creces el efecto inhibidor del herbicida.

SUPERVIVIENTE MISTERIOSO

En los invernaderos de Purdue, el experimento de Brabham con la ambrosía gigante demuestra otro tipo de resistencia, que parece haber evolucionado de forma independiente. En las malas hierbas sensibles, los efectos del glifosato se manifiestan primero en las células de división rápida del meristemo. (El compuesto también alcanza las raíces, donde altera la resistencia de la planta a los hongos; aunque resulta difícil determinar la causa exacta de la muerte en una planta, después de la fumigación con glifosato las raíces suelen aparecer arrugadas y podridas.) Sin embargo, cuando Brabham examina sus muestras dieciocho horas después de la pulverización observa algo muy diferente: las hojas grandes han comenzado a encresparse y han adquirido una coloración marrón, pero el meristemo sigue verde y se ve sano. Las hojas parecen segregar el herbicida, y en el plazo de una o dos semanas se secan y caen. Pero la planta sobrevivirá y volverá a regenerarse a partir del meristemo. «Desearía conocer lo que produce ese efecto», dice Weller, «porque lo mismo sucede en la resistencia a los patógenos. La hoja se muere, pero la enfermedad no se propaga al resto de la planta. Si identificáramos ese proceso, podríamos emplear la información en nuestro provecho».

Es importante recordar, según Weller, que la técnica Roundup Ready de Monsanto no originó por sí sola el problema. La resistencia de las malas hierbas al glifosato se desarrolló de manera independiente. Pero la disponibilidad de semillas de plantas resistentes al glifosato ha permitido a los agricultores tomar el camino más fácil: el de rociar los campos con Roundup y descartar otras técnicas de control de malas hierbas o el empleo de otros productos. Podían haber seguido el ejemplo de la medicina, que se basa en una estrategia de múltiples fármacos para luchar contra virus que mutan con rapidez, como el VIH; la probabilidad de que un único organismo desarrolle resistencia a varios compuestos a la vez es muy baja, por lo que el método no deja en teoría supervivientes.

Es justo decir que Monsanto, que intentaba compensar la enorme inversión realizada, no trató precisamente de disuadirlos. «La resistencia al glifosato se podría haber evitado, o al menos aplazado por mucho tiempo, si los cultivadores lo hubieran utilizado combinado con otro herbicida», reflexiona Glenn Niza, un agente de extensión agraria de Purdue que trata regularmente con agricultores de todo el estado. «Pero la agricultura es un negocio como cualquier otro.» En realidad, no exactamente como cualquier otro: los cultivadores obtienen un beneficio marginal —es decir, después de sufragar los gastos— y sus esfuerzos se ven limitados, no solo por el costo, sino por la duración del día y de la época de crecimiento. «Más vale prevenir que curar», añade Niza, «pero aun así hay que pagar por la prevención».

Y los agricultores tendrán que pagarlo. Las empresas de productos químicos y biotecnología se esfuerzan por introducir en las plantas agrícolas genes de resistencia a otros herbicidas. Monsanto espera poner en el mercado, en uno o dos años, semillas de plantas resistentes al herbicida dicamba; la empresa Dow ha desarrollado un gen de resistencia a 2,4-D. Las características seleccionadas se incluirán, junto con los genes Roundup Ready, en una nueva generación de semillas transgénicas. De esta manera, los agricultores podrán esparcir en sus campos dos herbicidas, juntos o de forma secuencial, en lugar de confiar solo en el glifosato. La compañía DuPont ya vende semillas resistentes al glifosato y a otro herbicida, el glufosinato. Esas semillas cuentan además con otras características obtenidas por ingeniería genética, como el gen del Bt, un insecticida que existe en la naturaleza.

La nueva perspectiva es acogida con recelo por muchos agrónomos. Dicamba y 2,4-D son productos antiguos cuyo uso es posible gracias a los reglamentos federales; ambos se consideran más tóxicos y persistentes que el glifosato, y hoy seguramente no superarían el proceso de registro para su aprobación. Dicamba, en particular, se volatiliza fácilmente después de la aplicación, se desplaza en el aire y se deposita en zonas cercanas, donde se sabe que ha llegado a dañar otros cultivos o la vegetación silvestre. Se ha planteado además una pregunta, todavía sin respuesta: ¿cuántos rasgos pueden añadirse a una semilla antes de que empiece a afectar el vigor y la productividad de la planta? Todo lo que se pida de más a un organismo consume energía necesaria para lo que debería hacer en primer lugar, es decir, producir alimento.

El problema más importante tiene que ver con el futuro de la agricultura y el abastecimiento de alimentos a una población mundial creciente, cada vez más rica y urbana. «El sistema actual presenta un enfoque industrial, basado en un remedio milagroso; no existe una estrategia que contemple el ecosistema agrícola», opina Gurian-Sherman. Con una población de malas hierbas resistentes al glifosato ya establecidas en muchos lugares, es prácticamente seguro que, si dicamba y 2,4-D se utilizan del mismo modo, algunas de las especies adquirirán también resistencia a esos herbicidas. Entonces, ¿a qué remedio acudiremos? Existe un número limitado de familias de herbicidas, y la industria química no está desarrollando otros nuevos, porque la ingeniería genética aplicada a las semillas genera muchos más beneficios. «En principio no me opongo a la ingeniería genética, pero ¿a dónde nos está llevando?», se pregunta Gurian-Sherman. «Miles de millones en investigación han producido solo dos características útiles (resistencia al glifosato y expresión de Bt), mientras que las técnicas tradicionales han proporcionado, con un costo menor, resistencia a insectos y enfermedades, tolerancia a la sequía y mejor rendimiento de los cultivos.»

Gurian-Sherman sostiene que la solución no se alcanzará con la aplicación de una técnica más cara, sino que deberá fundamentarse en la ciencia de los cultivos, mediante la adopción de estrategias que le hubiesen resultado familiares a Gregor Mendel en el siglo XIX: mejoras progresivas en el rendimiento, en la resistencia a la sequía y en el uso de fertilizantes. «Es necesario un cambio fundamental en nuestra forma de pensar acerca de la agricultura, y nuestro sistema actual no nos conduce a ello.»

PARA SABER MÁS

Failure to yield: evaluating the performance of genetically engineered crops. Doug Gurian-Sherman. Union of Concerned Scientists, abril de 2009.

The impact of genetically engineered crops on farm sustainability in the United States. Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level Economics and Sustainability, National Research Council. National Academies Press, 2010.

Sociedad Española de Malherbología: **www.semh.net**

Base de datos mundial sobre resistencias: **www.weedscience.com**



Roland R. Griffiths es profesor del departamento de psiquiatría y neurociencias de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. Su línea principal de investigación se ha centrado en los efectos conductuales y subjetivos de las drogas que alteran el estado de ánimo. Es el investigador principal de los estudios sobre la psilocibina realizados en su universidad.



Charles S. Grob es profesor de psiquiatría y pediatría en la facultad de medicina David Geffen, en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) y director de la sección de psiquiatría infantil y juvenil del Centro Médico Harbor-UCLA. Ha dirigido ensayos clínicos sobre varias drogas alucinógenas, como la psilocibina en el tratamiento de la ansiedad en enfermos de cáncer.



SALUD

Uso terapéutico de alucinógenos

En apenas unas horas, ciertas sustancias que producen alteraciones mentales pueden inducir un profundo reajuste psicológico, algo que la terapia al uso tardaría decenios en conseguir

Roland R. Griffiths y Charles S. Grob

Sandy Lundahl, educadora sanitaria de 50 años de edad, se dirigió una mañana de primavera de 2004 al centro de investigación sobre biología de la conducta de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. Se había presentado como voluntaria para participar en uno de los primeros ensayos sobre fármacos alucinógenos llevados a cabo en Estados Unidos en los últimos tres decenios. Rellenó varios cuestionarios, charló con los dos supervisores que la acompañarían las ocho horas siguientes y tomó asiento en el confortable espacio, semejante a una sala de estar, donde tendría lugar la sesión. A continuación ingirió dos cápsulas azules y se reclinó en un sofá. Para ayudarla a relajarse y a aislarse del entorno se le proporcionó un antifaz y unos auriculares por los que escuchaba un programa de música clásica.

Las cápsulas contenían una dosis elevada de psilocibina, el principal componente de los hongos «mágicos» que, como el LSD y la mescalina, produce modificaciones en el estado de ánimo y en la percepción, aunque muy rara vez provoca verdaderas alucinaciones. Al acabar la sesión, tras disiparse los efectos de la psilocibina, Lundahl, que nunca antes había tomado alucinógenos, rellenó otros cuestionarios más. Sus respuestas indicaban que durante la sesión había atravesado por una profunda experiencia mística similar a la que referían visionarios espirituales de distintas culturas y épocas. Esta se caracteriza por una sensación de interconexión con todos y con todo, acompañada de alegría y la percepción de trascender el tiempo, el espacio y lo sagrado.

En una visita de control realizada más de un año después, Lundahl afirmó que seguía pensando cada día en la experiencia por la que había pasado y, lo que resultaba más notable, la veía como el suceso más significativo de su vida, tanto desde un punto de vista personal como espiritual. Había percibido cambios positivos en su estado de ánimo, su actitud y su manera de comportarse, así como un incremento notable de su nivel de satisfacción vital. «Es como si la experiencia hubiera acelerado mi desarrollo espiritual», escribió. «Soy más comprensiva y cariñosa, lo que me ayuda a compensar las heridas que hubiera infligido en el pasado... Cada vez percibo mejor a la gente, como si la luz divina fluyera a través de ellos.»

Lundahl fue una de los 36 participantes en un estudio dirigido por uno de los autores (Griffiths) en la Universidad Johns Hopkins, trabajo que comenzó en 2001 y se publicó en 2006; dos

EN SÍNTESIS

Durante los años cincuenta y sesenta del siglo pasado aparecieron centenares de informes sobre alucinógenos. El uso inapropiado de los mismos condujo a la ilegalización de las drogas y esa línea de investigación se paralizó.

Los primeros estudios sugerían que esas drogas podían ayudar a tratar a pacientes con diversas alteraciones psiquiátricas, efecto que no se pudo confirmar debido a la obstaculización de las investigaciones.

Una nueva serie de estudios sobre los alucinógenos, sobre todo la psilocibina, examinan la eficacia de las drogas en el tratamiento de la ansiedad de los enfermos de cáncer o como ayuda para superar una adicción.

Los primeros resultados de las nuevas investigaciones son prometedores. Algunos pacientes relatan profundas experiencias místicas con la droga, gracias a lo cual pueden realizar cambios importantes en su vida.

JAMES WORRELL

años más tarde, se realizó un informe de seguimiento. Cuando apareció el primer artículo en la revista *Psychopharmacology,* numerosos científicos dieron la bienvenida a un área de investigación abandonada desde hacía mucho tiempo. Los estudios sobre la psilocibina en la Johns Hopkins continúan hoy en dos direcciones: una explora los efectos psicoespirituales de la sustancia en voluntarios sanos; la otra indaga si los estados alterados de conciencia inducidos por los alucinógenos, sobre todo las experiencias místicas, pueden aliviar trastornos psiquiátricos y de conducta, incluidos algunos en los que los tratamientos habituales presentan escasa eficacia. La principal droga utilizada en las recientes investigaciones ha sido la psilocibina, un alucinógeno clásico. Como otras sustancias de este tipo (psilocina, mescalina, DMT y LSD), la psilocibina actúa en los receptores de las neuronas serotoninérgicas. Paradójicamente, las sustancias que proceden de otros tipos de drogas y que producen efectos diferentes a los de los alucinógenos clásicos llevan también la etiqueta de «alucinógeno» en los medios de comunicación y en los informes epidemiológicos. Entre estos compuestos, algunos de ellos con potencial terapéutico, figuran la ketamina, el MDMA (conocido como «éxtasis»), el salvinorín A y la ibogaína.

SUPERAR EL LEGADO DE LEARY

La investigación terapéutica con alucinógenos se propone verificar los resultados preliminares de los estudios de los años cincuenta, en los que participaron miles de personas. En algunos de ellos se insinuaba que los alucinógenos podían ayudar a tratar la drogadicción y evitar la angustia psicológica en la enfermedad terminal. Las investigaciones se paralizaron a principios de los años setenta, cuando aumentó el uso recreativo de los alucinógenos, sobre todo del LSD, que fue divulgado por los medios de comunicación sensacionalistas. También se vieron afectadas por la noticia, ampliamente difundida, del despido de Timothy Leary y Richard Alpert de la Universidad de Harvard en 1963, por haber utilizado métodos científicos poco convencionales con alucinógenos. Estos consistían, en el caso de Alpert, en el suministro de psilocibina a un estudiante fuera del campus.

El uso creciente y sin supervisión de sustancias poco conocidas, propugnado en parte por Leary, dio lugar a una violenta reacción. La Ley estadounidense de Sustancias Controladas de 1970 colocó los alucinógenos comunes en la categoría I, la más restrictiva. Se introdujeron nuevos límites en los ensayos con humanos, las ayudas federales cesaron y los investigadores involucrados en ese campo se vieron marginados profesionalmente.

Pasaron varios decenios antes de que esa actitud rígida diera paso a estudios rigurosos. Las experiencias místicas provocadas por los alucinógenos despertaron interés, sobre todo, por su potencial para producir cambios positivos rápidos y duraderos en el estado de ánimo y en la conducta, resultados que los métodos psicoterapéuticos habituales lograban solo después de años. El trabajo llevado a cabo en la Johns Hopkins es apasionante porque demuestra la posibilidad de provocar tales experiencias, de forma controlada, en la mayoría de los sujetos estudiados. Por vez primera se realizan investigaciones en las que se lleva a cabo el seguimiento de voluntarios antes y después de ingerir la droga, y se examinan las causas y los efectos psicológicos y sobre la conducta de sus experiencias.

En su reciente trabajo, el grupo de Griffiths creó cuestionarios para registrar las experiencias místicas sucedidas sin la ingestión de drogas. También evaluó el estado psicológico general de los participantes dos y catorce meses después de la sesión con psilocibina. Los datos demostraron un incremento de la autoestima, una mayor sensación de satisfacción interna, una mejor capacidad para tolerar la frustración, un menor nerviosismo y un aumento del bienestar general. Las calificaciones que sobre su conducta hicieron amigos, familiares y compañeros de trabajo, a quienes no se informó sobre el experimento con la droga, concordaron con las que se otorgaron los propios participantes. Un comentario característico de uno de ellos fue: «Tuve la sensación de que todo era Uno, percibí la esencia del universo y supe que Dios no pide nada de nosotros excepto recibir amor. No estoy solo. No tengo miedo a la muerte. Soy más paciente conmigo mismo». Otra participante sintió tal inspiración que escribió un libro acerca de sus experiencias.

ALIVIO DEL SUFRIMIENTO

Cuando hace unos cuarenta años se paralizó la investigación sobre terapias con alucinógenos, se interrumpieron varias tareas, entre ellas el tratamiento del alcoholismo y otras drogadicciones, la ansiedad asociada al cáncer, el trastorno obsesivo-compulsivo, el estrés postraumático, las patologías graves del carácter y el autismo. Por entonces, la mayoría de los informes publicados consistían en relatos anecdóticos de tratamientos con alucinógenos, basados en pruebas menos sólidas que las de los ensayos clínicos comparativos. Ni siquiera los mejores trabajos de esos años incorporaban los estrictos métodos y condiciones de control habituales en la moderna investigación clínica psicofarmacológica.

Los enfermos de cáncer padecen con frecuencia ansiedad y depresión graves, y los antidepresivos y ansiolíticos les ofrecen una ayuda limitada. En los años sesenta y principios de los setenta, más de doscientos pacientes con cáncer recibieron alucinógenos clásicos durante una serie de ensayos clínicos. En 1964, Eric Kast, de la Escuela Médica de Chicago, que suministró LSD a pacientes terminales con dolor muy intenso, señaló que estos habían desarrollado una peculiar indiferencia hacia la gravedad de su situación y hablaban libremente acerca de la inminencia de su muerte, con una actitud considerada inapropiada en nuestra civilización occidental, pero muy beneficiosa para su estado psíquico. Estudios posteriores del grupo de Stanislav Grof y William Richards realizados en el Hospital estatal Spring Grove, cerca de Baltimore (y más tarde en el Centro de Investigación Psiquiátrica de Maryland), analizaron el efecto del LSD y de otro alucinógeno clásico, la dipropiltriptamina (DPT). Los ensayos demostraron una disminución de la depresión, la ansiedad y el miedo a la muerte; los pacientes que habían presentado una experiencia de tipo místico obtuvieron las mejorías más importantes en las puntuaciones psicológicas de bienestar.

Uno de los autores (Grob) ha actualizado ese trabajo. En septiembre de 2010, un artículo publicado en *Archives of General Psychiatry* dio cuenta de un estudio piloto llevado a cabo entre 2004 y 2008 en el Centro Médico Harbor-UCLA para comprobar si las sesiones con psilocibina reducían la ansiedad de doce pacientes con cáncer terminal. Aunque el estudio era demasiado reducido como para llegar a conclusiones definitivas, se obtuvieron resultados alentadores: los pacientes habían mostrado una disminución de la ansiedad y una mejoría en su estado de ánimo, incluso algunos meses después de la sesión con psilocibina. Al igual que en los estudios preliminares, los participantes afirmaron que sentían menos miedo ante una muerte inminente. Las universidades de Johns Hopkins y de Nueva York realizan en la actualidad una serie de ensayos con enfermos de cáncer en los que aplican dosis más altas de psilocibina; se aumenta así la probabilidad de inducir experiencias místicas

con efectos beneficiosos duraderos, según indican las investigaciones anteriores. En Suiza, en un estudio piloto semejante, se utiliza LSD en vez de psilocibina.

Los alcohólicos, los fumadores de cigarrillos y los adictos a otras drogas afirman que, en algunas ocasiones, logran vencer sus adicciones después de una profunda experiencia mística sobrevenida espontáneamente, sin drogas. La primera oleada de ensayos clínicos con alucinógenos reconocía el posible poder terapéutico de esas experiencias transformadoras. Hace unas décadas, más de 1300 pacientes participaron en unos estudios sobre adicciones que dieron lugar a más de dos docenas de publicaciones. En algunos de los estudios se administraron altas dosis de drogas a pacientes poco preparados, con escasa ayuda psicológica; a unos pocos, incluso, se les ató a la cama. Los investigadores que tuvieron en cuenta la importancia del decorado y del ambiente y que suministraron un mejor apoyo a los pacientes obtuvieron en general mejores resultados. Ese primer trabajo ofreció resultados prometedores, pero no concluyentes.

Los ensayos sobre la nueva generación de alucinógenos, basados en mejores métodos, podrían determinar la capacidad de esas drogas para ayudar a las personas a superar sus adicciones. El grupo de Griffiths y Matthew Johnson ha comenzado un estudio piloto sobre el abandono del hábito de fumar mediante sesiones con psilocibina, como apoyo a una terapia cognitiva conductista, un tipo de tratamiento que enseña a los pacientes la manera de modificar sus pensamientos y su conducta para dejar de fumar.

Además del tratamiento de las adicciones, hace poco se han emprendido algunos estudios para comprobar si la psilocibina ayudaría a mitigar los síntomas del trastorno obsesivo-compulsivo. Otras sustancias controladas, con mecanismos de acción diferentes, han demostrado también potencial terapéutico. Hace poco se ha verificado que la ketamina (utilizada habitualmente a modo de anestésico), administrada a dosis bajas, produce una mejora más rápida de la depresión que los antidepresivos tradicionales como el Prozac. Y un estudio desarrollado en Carolina del Sur utilizó con éxito MDMA para tratar el trastorno de estrés postraumático en pacientes en los que había fallado el tratamiento clásico. En Suiza y en Israel se desarrollan estudios semejantes con MDMA.

Las últimas investigaciones sobre alucinógenos examinan si estas drogas pueden terminar con las adicciones o calmar la ansiedad de los enfermos de cáncer

RIESGOS Y CAMINO POR RECORRER

Para que los tratamientos con los alucinógenos clásicos sean aceptados, deberán superarse los temores derivados de los excesos con las drogas en los «psicodélicos años sesenta». A veces, los alucinógenos producen ansiedad, paranoia o pánico, lo que en situaciones no supervisadas puede llevar a lesiones accidentales o al suicidio. En un estudio de la Universidad Johns Hopkins, incluso después de una selección muy cuidadosa y al menos ocho horas de preparación con un psicólogo clínico, alrededor de un tercio de los participantes experimentaron algún momento de miedo intenso, y casi una quinta parte sintieron paranoia en algún momento de la sesión. Sin embargo, cuando el centro proporcionó un entorno hogareño de apoyo y se contó con la presencia constante de guías preparados, los participantes no sufrieron efectos nocivos duraderos.

Otros riesgos potenciales de los alucinógenos, que pueden durar varios días o incluso más tiempo, son una psicosis prolongada, trastornos psicológicos y alteraciones de la visión u otros sentidos. Estos efectos secundarios se producen pocas veces y resultan aún más infrecuentes en voluntarios seleccionados y preparados psicológicamente. Aunque a veces se abusa de los alucinógenos clásicos (de forma que pueden poner en peligro a los consumidores o a otras personas), no se los considera drogas adictivas porque no llevan a un consumo compulsivo ni producen síndrome de abstinencia. Con el fin de reducir las reacciones adversas, el grupo de Griffiths ha publicado en fecha reciente un conjunto de directrices de seguridad para realizar estudios con alucinógenos a dosis elevadas. Siempre que los investigadores controlen los riesgos que conllevan las drogas, pensamos que los estudios con estas sustancias deben continuar, debido a su posible capacidad para transformar la vida de un enfermo de cáncer o de un drogadicto. Si se comprueba que los alucinógenos sirven para tratar la drogadicción o la ansiedad existencial asociada a enfermedades potencialmente mortales, se podría explorar a continuación su aplicación en tratamientos relacionados con importantes problemas de salud, como los trastornos alimentarios, las conductas sexuales de riesgo o una amplia gama de conductas inadaptadas.

Además, las técnicas de neuroimagen y farmacológicas, que no existían en los años sesenta, permitirían entender mejor el modo en que actúan las drogas. La imagen de las regiones cerebrales involucradas en las emociones intensas y en los pensamientos de las personas que se hallan bajo los efectos de las drogas proporcionará una ventana a la fisiología que subyace bajo las experiencias místicas producidas por los alucinógenos. Las futuras investigaciones podrían centrarse también en estrategias no farmacológicas que actuaran con mayor rapidez y eficacia que las prácticas espirituales tradicionales, como la meditación o el ayuno, para inducir experiencias místicas o las deseadas modificaciones de conducta.

Comprender la manera en que las experiencias místicas engendran actitudes benevolentes hacia uno mismo y hacia los demás ayudará a explicar el bien documentado papel protector de la espiritualidad en el bienestar psicológico y en la salud. Esas experiencias pueden lograr un sentido profundo y duradero de la interconexión entre todas las personas y las cosas, una perspectiva fundamental en las enseñanzas éticas de las religiones y tradiciones espirituales de todo el mundo. El conocimiento de la biología de los alucinógenos clásicos podría ayudar a clarificar los mecanismos esenciales de la conducta ética y cooperativa humana; un conocimiento, creemos, que puede resultar crucial en la supervivencia de nuestra especie.

PARA SABER MÁS

Hallucinogens: A reader. Dirigido por Charles S. Grob. Tarcher, 2002.

Psilocybin can occasion mystical-type experiences having substantial and sustained personal meaning and spiritual significance. R. R. Griffiths et al. en *Psychopharmacology*, vol. 187, n.º 3, págs. 268-283, agosto de 2006. **csp.org/psilocybin**

Human hallucinogen research: Guidelines for safety. M. W. Johnson, W. A. Richards y R. R. Griffiths en *Journal of Psychopharmacology*, vol. 22, n.º 6, págs. 603-620, agosto de 2008.

Pilot study of psilocybin treatment for anxiety in patients with advanced-stage cancer. Charles S. Grob et al. en *Archives of General Psychiatry*. Publicado en línea el 6 de septiembre de 2010.

Proyecto sobre el uso de la psilocibina contra el cáncer de la Universidad Johns Hopkins: **www.cancer-insight.org**

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Burbujas ebrias

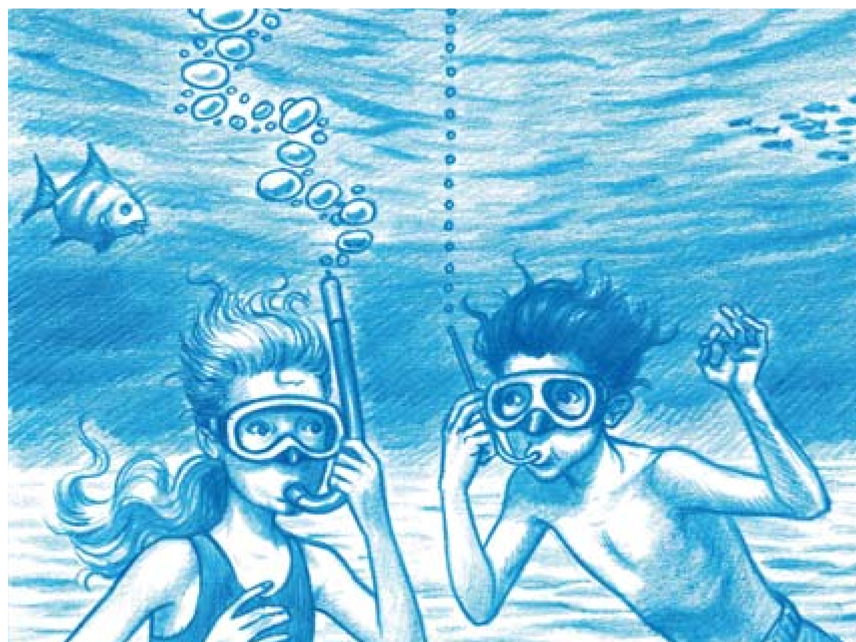
Si ve una burbuja de aire de buen tamaño elevarse en línea recta en el interior del agua, es probable que usted haya bebido otro líquido

Leonardo da Vinci, en su códice *Leicester*, señala que, al contrario que las piedras que caen dentro del agua, las burbujas de aire suben en zigzag o describiendo una hélice. Un análisis de las fuerzas que intervienen en el proceso parece indicar, a primera vista, que el descenso de un cuerpo más denso que el agua y la ascensión de uno más ligero son de la misma naturaleza. La resolución de la paradoja no resultó sencilla: hubo de esperar hasta la década de 1990.

¿Qué fuerzas actúan sobre una burbuja inmersa en agua? Además del peso, insignificante en este caso, hemos de considerar el empuje de Arquímedes (dirigido hacia arriba e igual al peso del agua contenida en un volumen igual al de la burbuja) y el rozamiento del fluido, que se opone al movimiento. Tras una fase inicial de aceleración, esperaríamos que la pompa ascendiese en línea recta a velocidad constante: aquella a la que el rozamiento iguala en magnitud al empuje.

Así ocurre con las burbujas de poco tamaño. Una pompa de medio milímetro de diámetro asciende a lo largo de la vertical a razón de unos cinco centímetros por segundo. Pero, cuando el diámetro supera 1,3 milímetros, la burbuja experimenta un movimiento en zigzag en el plano horizontal. ¿Por qué?

En el pasado se argumentó que el efecto se debía a que la pompa se achata. Sin embargo, una esfera de plástico, menos densa que el agua pero rígida, experimenta los mismos movimientos de vaivén. La clave del enigma, hallada gracias a los avances en las técnicas de visualización y simulación de flujos, reside en la estela que dejan las burbujas.



Las burbujas pequeñas ascienden en línea recta, pero las mayores suben en zigzag debido a las fuerzas laterales que origina el movimiento turbulento del líquido en torno a la burbuja. Esos torbellinos aumentan conforme crece el tamaño de la pompa.

BRUNO VACARO

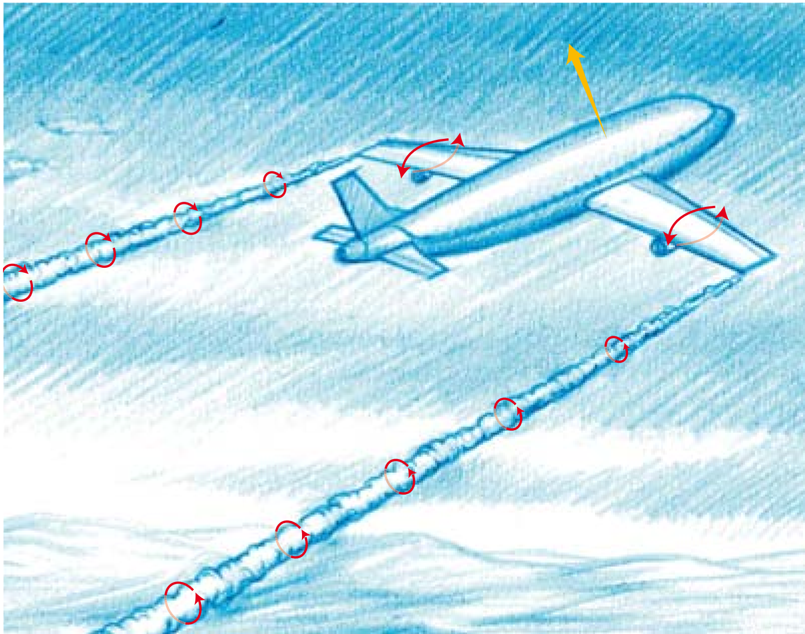
Turbulencias

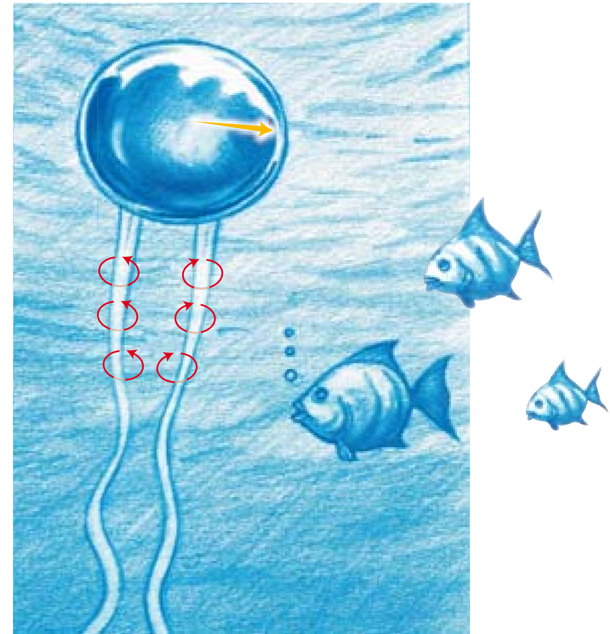
En el caso de una burbuja diminuta, los filetes de agua se apartan para hacerle paso y se cierran tras ella, con lo que dejan una estela regular y recta. En cambio, una burbuja de mayor tamaño deja atrás dos estelas, alrededor de las cuales el agua gira en sentidos opuestos. En su forma y disposición, esos torbellinos se asemejan a los que nacen de los extremos de las alas de un avión, cuya signatura es bien conocida: dos regueros de cristales de hielo, formados por la condensación del vapor de agua en las regiones de baja presión (y más frías, por tanto) asociadas a las turbulencias.

En el caso de un avión, la existencia y propiedades de esos torbellinos se conocen bien. En el borde posterior del ala, el aire se desvía hacia abajo y, como reacción, aparece una fuerza de sustentación hacia arriba. Ahora bien, el flujo de aire en las proximidades del ala equivale a la superposición de un flujo rectilíneo y otro circular alrededor del ala, puesto que el aire se eleva en el borde de ataque de esta, pasa por encima y desciende al alcanzar el borde posterior. El avión se sustenta gracias a ese torbellino que rodea al ala.

El torbellino, cuyo eje es perpendicular a la dirección de vuelo, llega hasta la extremidad del ala; más allá, se encuentra sin nada que sustentar, por lo que vira entonces hacia atrás y genera, en los extremos de las alas, una estela paralela al movimiento del avión.

¿Qué relación guarda lo anterior con el movimiento lateral de las burbujas? La





En un avión, el aire describe alrededor de las alas un movimiento turbulento cuyo eje es perpendicular a la dirección de vuelo. En los extremos de las alas, las turbulencias se deforman y crean dos estelas paralelas a la dirección de avance: líneas en torno a las cuales el aire se enrolla. La fuerza de sustentación (*flecha amarilla*) creada por el movimiento turbulento apunta en la dirección perpendicular al plano que definen las estelas. El fenómeno es el mismo en una burbuja que asciende en el seno de un líquido: ahora, las turbulencias generan una fuerza que desplaza la burbuja en el plano horizontal.

BRUNO VACARO

doble estela de una burbuja revela la existencia de un flujo turbulento a su alrededor. Al igual que en el caso del avión, ese flujo induce una fuerza perpendicular al movimiento de avance de la burbuja. Como ahora este tiene lugar hacia arriba, la fuerza es horizontal y origina un movimiento errático en esa dirección.

Podemos preguntarnos a qué se deben las turbulencias. En un avión, es la forma del ala la que genera los torbellinos, ya que redirige el aire hacia abajo. Pero una burbuja es esférica, por lo que no es su geometría la que provoca el efecto. En este caso, las turbulencias se deben a la inestabilidad intrínseca al movimiento del fluido. Cuanto mayor es la burbuja, menor resulta el valor relativo de las fuerzas de rozamiento, que son las que estabilizan la trayectoria. Por encima de un tamaño crítico, la menor perturbación generará una turbulencia que la impulsará hacia un lado. A mayor tamaño de la burbuja, más se complican sus movimientos; a la postre, estos se tornan imprevisibles.

El físico Etienne Guyon estudió un fenómeno de este tipo, al que denominó «efecto Popov» (adelantándose a los acontecimientos, ya que supuso que algún sabio ruso probablemente ya lo hubiese descrito con anterioridad): si soltamos una pelota de ping-pong dentro del agua y cerca de la superficie, saldrá a flote a lo largo de la perpendicular. Pero, si la liberamos a una profundidad mayor, el ángulo de salida será casi siempre oblicuo.

¿Por qué no se produce el mismo fenómeno con objetos densos? Consideremos una bola cuya densidad dobla a la del agua. La superposición del peso y el empuje de Arquímedes resulta en una fuerza hacia abajo cuya magnitud iguala (con excelente aproximación) a la del impulso de Arquímedes que empujaría hacia arriba a una burbuja de aire del mismo tamaño. Sin embargo, la burbuja subirá en zigzag, mientras que la bola caerá en línea recta.

Esta diferencia se debe a la inercia que un cuerpo y otro oponen al movimiento. Para acelerar cualquiera de ellas, también hay que apartar el fluido en el que se desplazan: el agua. En el siglo XIX, Lord Kelvin demostró que la masa de agua arrastrada por una esfera en movimiento acelerado es igual a la mitad de la masa de líquido que encerraría la esfera. Por tanto, la bola presenta una masa inercial (la propia más la del agua que ha de desplazar) cinco veces mayor que la de la burbuja (que, en esencia, se reduce a la del agua que arrastra). Ello basta para estabilizar el movimiento frente a pequeñas perturbaciones.

Sobre la masa de los cuerpos

Como hemos visto, la acción del fluido sobre la burbuja o la bola no se limita a una fuerza de empuje y otra de rozamiento. La inercia, una propiedad que suele considerarse intrínseca al cuerpo, también se modifica. La solución al enigma planteado por Leonardo da Vinci pasa, por tanto, de ser una anécdota a tornarse sorprendente: para determinar la masa efectiva de un objeto, hemos de tener en cuenta sus interacciones con el entorno.

La propiedad anterior interviene en varios dominios de la física. En el caso de una burbuja, las consideraciones al respecto resultan sencillas. Pero si consideramos las interacciones de un electrón con su propio campo electromagnético, el cálculo de la masa inercial de la partícula arroja un resultado... ¡infinito! Por fortuna, gracias a una técnica matemática, la renormalización, los físicos de partículas logran manejar esas cantidades divergentes para obtener resultados finitos en sus predicciones experimentales.

PARA SABER MÁS

Bubbles. A. Prosperetti en *Physics of Fluids*, vol. 16, págs 1852-1865, 2004.
Path instability of a rising bubble. G. Mougin y J. Magnaudet en *Physical Review Letters*, vol. 88, artículo 014502, 2002.
Idées de physique. Blog de los autores, **blog.idphys.fr**

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.



Se equivocó la paloma

Algunas aplicaciones sociales del principio del palomar

Los juegos matemáticos más interesantes siempre son aquellos cuyo enunciado nunca parece proporcionar información suficiente para resolverlos. El siguiente problema es uno de mis ejemplos preferidos:

> *Una pareja invita a cenar a cuatro parejas más. Al llegar, algunas personas se dan la mano y otras no. Sabemos que nadie da la mano a su pareja y, por supuesto, nadie se da la mano a sí mismo. Cuando todo el mundo se ha saludado, uno de los anfitriones se entera de que cada una de las otras nueve personas se ha dado la mano con un número diferente de asistentes. ¿A cuántas personas dio la mano nuestro anfitrión? ¿A cuántas personas dio la mano su pareja?*

Este problema, debido al matemático Paul Halmos, nació como una ilustración del potencial del principio del palomar (o de Dirichlet, quien lo enunció bajo el nombre de *Schubfachprinzip*):

> PRINCIPIO DEL PALOMAR: Si tenemos m palomas en n palomares y $m > n$, debe haber al menos un palomar con más de una paloma.



Aunque pueda parecer completamente obvio, este principio constituye una herramienta indispensable para cualquier aficionado a los juegos matemáticos. Veamos una aplicación inmediata. Con ayuda del principio del palomar no resulta difícil demostrar lo siguiente:

> *Si escogemos seis números entre 1 y 10, dos de ellos sumarán 11.*

Solo hay cinco pares de números entre 1 y 10 cuya suma sea 11: (1, 10), (2, 9), (3, 8), (4, 7) y (5, 6). Dado que cualquier número comprendido entre 1 y 10 pertenece a alguno de estos pares, podemos pensar en los números que hemos de escoger como en palomas, y en cada uno de los pares como si fueran los palomares. El principio del palomar garantiza que al menos dos números deben pertenecer al mismo par, por lo que siempre habrá dos que sumen 11.

Pero otras aplicaciones ya no resultan tan inmediatas:

> *Si escogemos cinco números naturales cualesquiera, entonces la suma de tres de ellos debe ser un múltiplo de 3.*

Para demostrarlo, los números volverán a desempeñar el papel de palomas. Pero, ahora, los palomares serán el *resto* que obtengamos al dividir los números entre 3. Existen tres restos posibles: 0, 1 y 2, por lo que disponemos de un máximo de tres palomares. Ahora, razonemos por casos. O bien hay tres números en un mismo palomar, o bien no. Si hay tres números en un palomar, el resto que obtenemos al dividirlos entre 3 es el mismo en los tres casos, por lo que su suma será divisible entre 3. Por otro lado, si no hay tres números en un mismo palomar, necesariamente ha de haber al menos uno en cada uno de los tres palomares. Sus restos al dividir entre 3 serán 0, 1 y 2, por lo que su suma será también divisible entre 3. En consecuencia, dados cinco números cualesquiera, siempre podremos escoger tres de ellos cuya suma sea múltiplo de 3.

Aplicaciones sociales

Veamos algunos casos antes de atacar el problema original:

> *En una reunión de diez personas, algunas se dan la mano al saludarse y otras no. Sabemos que nadie da la mano más de una vez a la misma persona y que, por supuesto, nadie se da la mano a sí mismo. Podemos deducir que al menos dos personas han dado la mano a un mismo número de asistentes.*

Para resolver el problema basta con notar que cada invitado puede dar la mano a un máximo de nueve personas. En principio, existen diez posibilidades por invitado: no dar la mano a nadie, dársela a una persona, a dos, a tres, etcétera. Sin embargo, o bien uno de los asistentes no saluda a nadie, o bien todos saludan a alguien. Si todos saludan a algún asistente, entonces hemos de descartar la opción de no saludar a nadie, lo que reduce a nueve el número de posibilidades por invitado. Por otro lado, si uno de ellos no saluda a nadie, dado que se trata de un gesto recíproco, cada uno de los restantes solo puede dar la mano a lo sumo a ocho personas, por lo que el número de posibilidades por invitado se reduce otra vez a nueve. Ahora, los asistentes a la reunión serán las palomas y cada una de nueve posibilidades, los palomares. Como tenemos diez palomas y, en cualquiera de los casos, un máximo de nueve palomares, se sigue que al menos dos personas han dado la mano al mismo número de asistentes.

> *Si la reunión tiene lugar en un local de nueve metros de largo por tres de ancho, entonces, por retraídos que sean los diez invitados, siempre habrá al menos dos de ellos situados a menos de dos metros y medio de distancia.*

Aquí basta dividir el rectángulo original en nueve rectángulos de tres me-

DANIEL UZQUIANO

tros de largo por uno de ancho. Si pensamos en los asistentes como en palomas y en los rectángulos como en palomares, al menos dos personas deben encontrarse en uno de los nueve rectángulos de tres por uno. La mayor distancia posible entre ellos viene dada por la diagonal del rectángulo: $\sqrt{5} \approx 2{,}24$. Por tanto, al menos dos invitados se encuentran a menos de dos metros y medio de distancia.

El siguiente problema presenta una dificultad mayor que los anteriores, ya que involucra ideas adicionales:

> *En una reunión de once personas (un anfitrión y diez invitados), algunas se dan la mano al llegar y otras no. Nadie da la mano más de una vez a la misma persona y nadie se da la mano a sí mismo. Sabemos que dos de los invitados, Juan y María, han dado la mano al mismo número de asistentes y que, entre los demás, cada uno ha saludado a un número diferente de personas. Demuestre que ni Juan ni María han saludado al doble de personas que el anfitrión.*

Merece la pena subrayar que hay once personas en la reunión (y no diez, como en los casos anteriores), ya que esta observación resulta crucial para resolver el problema.

Nadie puede saludar a más de diez personas. Al igual que en el problema anterior, o bien uno de ellos no saluda a nadie, o bien todos saludan a alguien. En el primer caso, cada asistente cuenta con diez posibilidades (no dar la mano a nadie o dársela a 1, 2, ..., 9 personas). En el segundo, existen también diez posibilidades para cada persona (un número entre 1 y 10). De nuevo, los asistentes serán las palomas y las posibilidades, los palomares. Como sabemos que, excepto Juan y María, nadie ha dado la mano a un mismo número de personas, todas y cada una de las posibilidades se corresponderán con lo que ha hecho al menos uno de los invitados.

Razonemos por casos. Si uno de los asistentes no ha saludado a nadie, todas las posibilidades entre 0 y 9 se corresponden con el número de saludos de alguien. Si sumamos todos esos apretones de manos, obtenemos 45 saludos, a los que hay que añadir los que corresponden a Juan (o María). Sin embargo, se trata de un gesto recíproco, por lo que el número total de saludos ha de ser par. Por tanto, el número de asistentes a quienes saludaron Juan y María debe ser impar y, en consecuencia, no puede doblar al número de saludos del anfitrión.

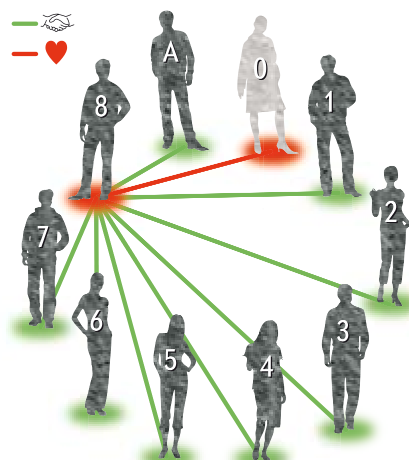
En el segundo caso, los invitados «ocupan» todos las palomares de 1 a 10. De nuevo, al sumar obtenemos un total de 55 saludos, más los que correspondan a Juan o María. Al igual que antes, ambos hubieron de efectuar un número impar de saludos, por lo que no pudieron haber dado la mano el doble de veces que el anfitrión.

El problema de Halmos

Ya nos hemos ejercitado lo suficiente como para resolver el problema que abría la columna. Aunque parezca difícil de creer, el enunciado del problema de Halmos nos proporciona la información necesaria para concluir que tanto el anfitrión como su pareja le dieron la mano a cuatro personas.

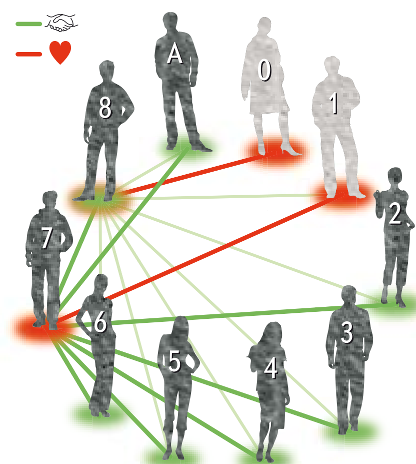
Tal vez merezca la pena ilustrar la solución del problema. Empecemos con un grafo que incluya a las diez personas y utilicemos la letra *A* para indicar quién es el anfitrión. A los restantes los etiquetaremos con una cifra que se corresponderá con el número de personas a quienes hayan dado la mano: 0 a la persona que no saludó a nadie, 1 a quien solo estrechó la mano de uno de los asistentes, etcétera. Nótese que las etiquetas han de incluir todos los números entre 0 y 8 (cada persona saludó a un número diferente de asistentes, pero nadie saludó a su pareja).

Ahora, unamos entre sí a las personas del diagrama para indicar quién saludó a quién. Empecemos por el invitado que dio la mano a ocho personas. Como nadie estrechó la mano con la persona etiquetada con el número 0, podemos concluir que el invitado con el número 8 saludó a los asistentes *A*, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7:



De lo anterior podemos deducir que 0 es la pareja de 8, ya que nadie dio la mano a su pareja, y 0 es la única persona a la cual 8 no saludó.

El siguiente paso consiste en trazar las siete líneas que unen a 7 con las personas a las que saludó. Notemos ahora que 7 no pudo haber dado la mano a 0 (pues 0 no saludó a nadie) ni a 1 (pues 1 solo estrechó la mano de 8). Por tanto, solo nos quedan siete candidatos: *A*, 2, 3, 4, 5, 6 y 8. Tan solo hay dos personas a las cuales 7 no ha dado la mano. Como sabemos que 0 es la pareja de 8, podemos concluir que 1 y 7 son pareja:

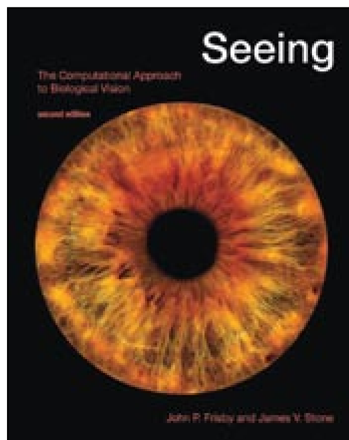


No es difícil anticipar el resto: 2 es la pareja de 6, y 3 es la pareja de 5. Por tanto, 4 es la pareja del anfitrión, quien, a su vez, también dio la mano a cuatro personas: 5, 6, 7 y 8.

Por último, mencionar que la técnica que acabamos de introducir para resolver el problema de Halmos permite averiguar a cuántas personas saludaron Juan y María en la reunión de once personas. Para ello, basta dibujar un grafo como los de arriba con once personas y considerar los dos casos. En el primero, etiquetaremos a los invitados con los números del 0 al 9 y utilizaremos la letra *R* para designar a Juan o a María, que repiten el número de saludos. En el segundo caso, repetiremos el procedimiento, en esta ocasión con los números del 1 al 10. Gracias al mismo razonamiento que antes, podremos ver que *R* saludó a cinco personas en cada uno de los casos.

PARA SABER MÁS

El problema de Halmos aparece enunciado (sin solución) al comienzo de **The thrills of abstraction**, un artículo de divulgación publicado en 1983 en *The Two-Year College Mathematics Journal*.



SEEING. THE COMPUTATIONAL APPROACH TO BIOLOGICAL VISION,

por John P. Frisby y James V. Stone. The MIT Press; Cambridge, Mass., 2010.

Visión

Progresos recientes

Vivimos sumergidos en un mar de luz que nos informa del mundo entorno. Los animales han sabido, en el curso de su evolución, sacar partido a ese fenómeno; escasean las especies ciegas. En la investigación actual sobre la visión se da por incuestionable lo que afirmaba David Marr: «Pretender comprender la visión por el estudio solo de las neuronas es como pretender comprender el vuelo de las aves a través del estudio de las plumas». Los autores aplican aquí los tres niveles de análisis propuestos ya por el propio Marr: el nivel computacional, el nivel algorítmico y el nivel de ejecución. El computacional especifica la naturaleza precisa del problema de la visión e identifica las restricciones que cabe emplear para resolverlo. El algoritmo ofrece detalles precisos sobre el modo en que debe ejecutarse la teoría. El nivel de ejecución física especifica de qué modo ejecutar el método en un sistema físico (el de las neuronas que intervienen en la visión).

Ver depende de una triple coincidencia, en el espectro electromagnético, del Sol, la atmósfera y el mecanismo de visión. La fuente de nuestra luz natural, el Sol, es una estrella G2 amarilla que se comporta como un cuerpo negro a una temperatura en torno a los 5800 grados kelvin y con un espectro que alcanza su pico alrededor de los 500 nanómetros. La irradiancia espectral (intensidad por intervalo de longitud de onda) cae a la mitad de valor culminante en los 370 nanómetros y los 730 nanómetros. La atmósfera es transparente a la luz solo entre 300 y 700 nanómetros; se ajusta estrechamente al pico de radiación solar. A mayor longitud de onda, una serie de bandas de absorción (debidas al oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua) absorben una fracción importante de la luz. A longitudes de onda más cortas, por debajo de los 280 nanómetros, la luz es absorbida por el ozono estratosférico, que nos protege de la radiación ultravioleta C, carcinogénica. Por debajo de los 200 nanómetros, el oxígeno y el nitrógeno la absorben también intensamente. (Por eso, los experimentos de laboratorio sobre luz ultravioleta de onda corta deben realizarse en el vacío.) Por fin, el mecanismo de visión, más que adaptado al espectro disponible, se encuentra restringido a esa banda. La visión humana se extiende desde la luz violeta (400 nanómetros) hasta la roja (700 nanómetros). Algunos animales pueden ver la luz ultravioleta (320 nanómetros); otros pocos se desenvuelven bien con luz cercana al infrarrojo (740 nanómetros).

Fuera de esos límites no hay visión. En los conos humanos, los picos de absorción que ocurren para la luz azul (420 nanómetros), verde (530 nanómetros) y roja (560 nanómetros) permiten una absorción tricromática. Las opsinas de los bastoncillos, responsables de la visión bajo condiciones de escasa iluminación, alcanzan un pico a los 498 nanómetros. En otros animales, el pico de los receptores de la luz ultravioleta A se cifra en torno a los 320 nanómetros. Por debajo de esa longitud de onda, el cristalino y otras partes ópticas del ojo absorben la luz antes de que alcance la retina. Los ácidos nucleicos y las proteínas absorben fuertemente a esas longitudes de onda. Basta la energía de los fotones para romper los enlaces covalentes. La visión en el ultravioleta A es común a insectos, crustáceos y numerosos vertebrados.

Pero la mayoría de los mamíferos, humanos incluidos, bloquean la longitud de onda de ultravioleta A debido quizás a la aberración cromática. En principio, nuestra visión del color debería fundarse en un conjunto de respuestas tajantes y espaciadas. Pero nuestros receptores de los conos se encuentran ajustados de una manera inesperadamente pobre. Nuestra sensibilidad a la luz azul, por ejemplo, es baja, mientras que las respuestas de los conos al verde y al gris se hallan muy próximas, hasta solaparse. Los conos del rojo alcanzan su pico en torno a los 560 nanómetros. Así, cuando nos proponemos identificar fresas rojas entre un follaje verde, nuestro cerebro tiene que comparar dos respuestas muy semejantes y solapantes. A lo largo de 180 millones de años, en que predominaban los dinosaurios, los primeros mamíferos desarrollaron una existencia nocturna. La visión del color no podía trabajar de noche; se perdió y nunca más volvió a recuperarse del todo.

Los rostros constituyen la categoría más importante de objetos, para nosotros y para los demás primates, pues aportan la base principal del reconocimiento de individuos, con evidente repercusión social. Los rostros han sido siempre importantes para el estudio de la trayectoria visual ventral. El descubrimiento de las neuronas selectivas de rostro en la corteza inferotemporal del mono, el más avanzado estadio de procesamiento en la trayectoria ventral, alentó la investigación sobre la representación nerviosa de objetos complejos. En los rostros se han estudiado cuestiones fundamentales sobre los mecanismos neurales de codificación, representación invariante (capaz de reconocer el mismo objeto desde diferentes perspectivas) y dinámica del procesamiento neural. La identificación del área fusiforme del rostro (una región ventral del cerebro implicada en la percepción del rostro) abrió un nuevo campo centrado en la organización modular de la corteza visual humana.

En la investigación del rostro se combinan la resonancia magnética funcional y el registro de señales nerviosas. En los simios se ha definido una red de seis regiones de procesamiento del rostro interconectadas, que abarcan los estadios intermedio y superior de la trayectoria ventral. Los primates pueden reconocer los rostros en condiciones de observación muy diversas y pese a transformaciones en el tamaño, posición, construcción, iluminación y orientación de la cabeza. De lo que se infiere que existen representaciones de la identidad individual invariantes a la transformación accidental de la imagen, como la dirección de la visión.

Las representaciones internas son dependientes de la perspectiva; el reconocimiento invariante se consigue mediante el aprendizaje de asociaciones entre las perspectivas, fundadas en su continuidad en el espacio y el tiempo. Según parece ahora, los estadios precoces del

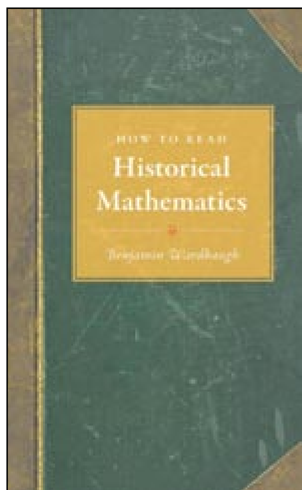
procesamiento en la trayectoria ventral portan información sobre categorías genéricas (rostro o no rostro) y perspectiva; los estadios ulteriores de procesamiento, en cambio, portan información sobre ejemplares individuales (Pedro frente Ana), eliminando información de la perspectiva para lograr un reconocimiento invariante.

La corteza visual primaria es la primera estructura de la corteza en recibir información visual. Las neuronas de la capa V1 son altamente selectivas de la orientación espacial de los límites entre luz y obscuridad; unas responden mejor a los bordes verticales; otras, a las líneas horizontales o diagonales. La orientación preferida es lo que se denomina organización «columnar». Las técnicas de formación de imágenes cartografían las orientaciones preferidas. Los mapas de orientación evidencian una estructura cuasiperiódica: las orientaciones preferidas cambian sin cesar a través de la lámina, repitiéndose cada milímetro. La distancia local entre repeticiones corresponde al período local del mapa. Los mapas contienen también los puntos donde convergen todas las orientaciones preferidas. En una de las investigaciones más recientes, se ha comparado la disposición de esos puntos de convergencia en tres mamíferos, *Otolemur crassicaudus* (un primate), otro simio emparentado (*Tupaia belangeri*) y el hurón (*Mustela putorius*). Comparten un diseño común.

Otro dominio muy activo es el de la plasticidad. Sabido es que el cerebro juvenil exhibe una capacidad notable para la plasticidad y la reparación, facultad que merma drásticamente en el adulto. En mamíferos jóvenes, los experimentos han mostrado que el cierre de un ojo durante varios días (deprivación monocular) obliga a las neuronas de la corteza visual a desplazar sus respuestas hacia los estímulos sensoriales que se originan en el otro ojo, no afectado. En una fase temprana del desarrollo, las experiencias visuales correctas cementan los fundamentos de la función visual del estado adulto. Cuando un ojo no trabaja con el otro, el adulto puede adolecer de una visión imperfecta. La plasticidad característica del período crítico no persiste en el adulto y suelen fracasar los reajustes de la función visual.

Por fin, se ha puesto especial empeño en la construcción de sistemas de visión por computador. Toman imágenes de una escena a modo de *input*, analizan la información visual de las imágenes presentadas y aplican luego la información para guiar un robot o establecer qué objetos contiene la escena y dónde se encuentran. Pero todavía hoy nos hallamos muy lejos de construir una máquina que iguale la capacidad humana de leer manuscritos, no digamos ya capaz de describir y analizar escenas naturales complejas.

—Luis Alonso



HOW TO READ HISTORICAL MATHEMATICS.

Benjamin Wardhaugh. Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2010.

Historia matemática

Guía de lectura y análisis de textos históricos

Se trata esta obra de una guía para la lectura y el análisis de textos matemáticos históricos. Enseña a examinarlos mediante el planteamiento de cuestiones relativas a su contenido, su autoría, su presentación material, su público y su relevancia. Y la exploración se hace mediante estudios de caso, partiendo cada uno de los cinco capítulos que componen la obra de un texto matemático distinto que se analiza bajo un determinado punto de vista: el contenido en el primer capítulo (*¿Qué dice?*), la autoría en el segundo (*¿Cómo fue escrito?*), la presentación material en el tercero (*Papel y tinta*), el público en el cuarto (*Lectores*) y la relevancia en el quinto (*Qué leer y por qué*).

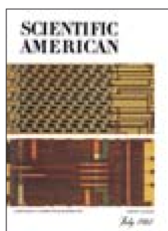
Así, el lector es guiado en el análisis de textos matemáticos del pasado para aprender, en primer lugar, a entenderlos —traducirlos— en lenguaje moderno y luego reflexionar en términos históricos sobre la notación, los términos y los conceptos. A continuación se le enseña cómo abordar la datación, localización y autoría de un texto, se le introduce en el manejo de las fuentes primarias y secundarias y se plantean las condiciones de contorno del autor. Seguidamente se abordan los usos del soporte material del texto como fuente de información. A mayor abundamiento, los diversos géneros matemáticos (textos docentes, trabajos de investigación, correspondencias, apuntes, etcétera) aparecen en función del público al que un determinado texto va dirigido. Finalmente, se entra en la consideración de la evolución de las matemáticas en cuanto a ideas, conceptos, métodos y técnicas de demostración, y la influencia y relevancia de estos cambios en cuanto a prioridad, novedad de enfoque y apertura de nuevas vías de desarrollo.

La lectura del texto, que es de una amenidad más que notable, viene acompañada de pausas señaladas para la reflexión personal y cuadros que resumen y destacan las principales cuestiones y técnicas metodológicas que van siendo desarrolladas. Además, cada capítulo termina con una serie de ejercicios propuestos y, finalmente, el libro concluye con la bibliografía y el índice analítico.

De lo expuesto no cabe sino deducir que esta obra es, en conjunto, de gran utilidad en sí misma tanto para docentes como para discentes en historia de las matemáticas, además de fuente de inspiración para el aprendizaje activo de esta disciplina que, por cierto, consigue presentar de manera muy, muy atractiva.

—Elena Ausejo

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Julio 1961

Pronóstico: revolución

«El comportamiento de la atmósfera es tan complejo que no cabía esperar que unos cuantos meses de observación por satélite aclarasen de pronto los procesos meteorológicos o desembocaran en una mejora inmediata de las predicciones. Sin embargo, los meteorólogos que han estado recibiendo los datos del *Tiros I* y del *Tiros II* están convencidos de que los satélites meteorológicos supondrán una auténtica revolución en su disciplina. Ante tal convencimiento, la Agencia de Meteorología de EE.UU., en colaboración con la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio, está planeando una serie ampliada de satélites meteorológicos.»



Julio 1911

Las raíces del cáncer

«Hace apenas diez años que se abordó la investigación experimental del cáncer, por lo que hoy solo nos hallamos a un paso del conocimiento auténtico y definitivo de esa enfermedad. Hasta ahora, los estudios experimentales no han revelado sus causas. No obstante, ha quedado claramente demostrado que el cáncer presenta una estrecha relación con el crecimiento celular, y que las futuras investigaciones deben orientarse en esa línea. En cuanto a si su causa primaria es un microorganismo, o si debemos buscar la explicación de su origen en algún cambio en la naturaleza o función de las células, nada podemos afirmar.»

Un fracaso veloz

«A la partida del gran buque *Olympic* en su primer viaje hacia el este desde Nueva York, el 28 de junio, el aviador Tom Sopwith intentó dejar caer un mensaje a bordo del vapor cuando este cruzaba los Estrechos. Descendió hasta menos de 60 metros del barco antes de dejar caer el paquete. Este no dio en la cubierta por cosa de uno o dos metros y se perdió en la bahía. No obstante, las posibilidades del aeroplano para entregar correos quedaron patentes.»

Caracoles solo por fuera

«En París se venden ahora unos caracoles cuya única parte genuina es el caparazón. Se cuenta que la imitación es tan parecida a la realidad que muchos sibaritas tienen una magnífica opinión del falso producto. Al parecer, se compran caparazones de caracol a basureros y pordioseros; una vez limpios, se rellenan de asaduras o comida para gatos, carnes blandas que se cortan en forma de sacacorchos al objeto de introducirlas en los caparazones mediante una máquina hábilmente diseñada. El recipiente se sella luego con grasa líquida, y el *escargot* queda listo para el consumidor. El secreto salió a la luz durante un pleito entablado por un empleado de la fábrica de caracoles para conseguir una compensación por la mutilación de un dedo causada por una de las máquinas.»

Nuestra marina mercante

«El Canal de Panamá pronto estará terminado. Tal como ahora parece, todos los países que gestionen una marina mercante estarán de inmediato en condiciones de hacer uso de esta nueva ruta marítima. Nuestro país, empero, no ha tomado medida alguna a ese fin, pero en cambio malgastamos nuestra energía discutiendo acerca de cómo podríamos recuperar la marina mercante. En mi opinión, ese retraso podría tener graves consecuencias. No es solo que perdamos la oportunidad y los beneficios inmediatos, sino que resultará difícil desplazar las rutas ya instauradas y las conexiones realizadas por el comercio extranjero. Debemos prepararnos desde el comienzo para aprovechar por completo la nueva ruta, establecida merced a nuestra iniciativa y a nuestro dinero.»



Julio 1861

La malaria y la guerra

«Aunque nos resulte difícil aceptarlo, todos sabemos que un soldado corre un riesgo cinco veces superior de morir de malaria que en combate. Nadie sabe qué es la malaria. Podría consistir en un organismo, animal o vegetal, tan diminuto que ni siquiera el microscopio lo detecta; o podría ser cierta característica de la atmósfera relacionada con la electricidad, la temperatura o la humedad; o tratarse de un gas generado durante la descomposición de la materia vegetal. Esta última es la hipótesis más admitida, pero no está en absoluto demostrada y hay en su contra hechos persistentes. Pero no cabe duda de que la malaria es un tóxico contenido en el aire y que se halla restringido a ciertas localidades. Todas las experiencias han confirmado las observaciones de los nativos peruanos acerca de la potente acción de la quina en contrarrestar la intoxicación. Aconsejamos a nuestros soldados que consulten con los médicos de sus respectivos regimientos sobre la conveniencia de ese tratamiento y que lo sigan con resolución.»



Marina mercante estadounidense: Un llamamiento a la expansión de la construcción naval civil, 1911

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CV, N.º 3; 15 DE JULIO DE 1911

FISICA

Vivir en un mundo cuántico

Vlatko Vedral

La mecánica cuántica no solo trata de partículas minúsculas. Su influencia alcanza todos los tamaños: pájaros, plantas y quizás incluso al ser humano.



CALENTAMIENTO GLOBAL

Entrevista a Richard A. Muller

Michael D. Lemonick

Por qué este experto en astrofísica y geofísica no contó en el Congreso estadounidense lo que los escépticos sobre el cambio climático esperaban oír.



ENERGÍA NUCLEAR

Pensando en el cisne negro

Adam Piore

El sorprendente accidente de Fukushima sitúa en un primer plano la nueva generación de reactores nucleares. ¿Son lo bastante seguros?

BIOLOGÍA MARINA

La buchada perfecta

Jeremy A. Goldbogen

Nuevos dispositivos arrojan luz sobre la biomecánica de los métodos de alimentación de los rorcuales, los mayores mamíferos marinos.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Radiografías espaciales* y *Siete propuestas innovadoras para la energía*, *Curiosidades de la física* y *Hace...*; Yago Ascasibar: *En busca de las galaxias perdidas*; Luis Bou: *Consciencia condicionada* y *Un órgano oculto en los ojos*; Raquel Santamarta: *Octoniones y teoría de cuerdas*; Juan Manuel González Mañas: *Agilizar la creación de vacunas*; Joandomènec Ros: *Maestros del disfraz* y *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *El mito sobre nuestro origen*; Mercè Piqueras: *Malas hierbas resistentes*; M.ª José Báguena: *Uso terapéutico de los alucinógenos*; Bruno Moreno: *Apuntes*; René Rodríguez: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España